



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ERKKA HARJU-SÄNTTI
ENERGIANSÄÄSTÖINVESTOINTIEN KANNATTAVUUDEN
ARVIOIMINEN KOULURAKENNUKSISSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Timo Kalema
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden ja ympäristötekni-
kan tiedekuntaneuvoston kokouk-
sessa 5. Lokakuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

HARJU-SÄNTTI, ERKKA: Energiansäästöinvestointien kannattavuuden arvioiminen koulurakennuksissa

Diplomityö, 95 sivua, 9 liitesivua

Lokakuu 2011

Pääaine: Talotekniikka

Tarkastaja: professori Timo Kalema

Avainsanat: Energiatehokkuus, IDA, koulut, simulointi, kannattavuus, kustannukset

Tämä diplomityö on osa Tampereen teknillisen yliopiston konstruktitekniikan laitoksen projektia ”Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen”. Projekti alkoi syksyllä 2009 ja loppuu marraskuussa 2011. Projektin tarkoituksena on tuottaa hyödyllistä tietoa ja työkaluja kuntapäätäjille julkisten rakennusten energiatehokkuuden selvittämiseen ja parantamiseen.

Diplomityön tarkoituksena on perehtyä koulujen energiansäästöinvestointien kannattavuuteen. Työn tavoitteena on löytää mahdollisimman yksinkertainen tapa selvittää halutun energiansäästöinvestoinnin aikaansaama säästö ja tarvittavan investoinnin kannattavuus tarkasteltavassa koulussa. Työssä tarkastellaan yhteensä seitsemän eri energiansäästötoimenpiteen tuomaa energiansäästöä ja kunkin toimenpiteen kannattavuutta säästetyn energian ja investointikustannusten perusteella kahdessa esimerkkikoulussa. Esimerkkikoulut ovat mukana projektissa ja niissä tehtiin erilaisia mittauksia, joista tarkemmin on kerrottu Eerik Mäkitalon diplomityössä.

Työn tarkasteluissa on käytetty IDA-ICE ohjelmistoa, jolla on rakennettu esimerkkikouluista erilaisia simulointimalleja luotettavimman riittävän yksinkertaisen simulointimallin löytämiseksi. Valitut energiansäästötoimenpiteet on mallinnettu kullakin simulointimallilla mahdollisten poikkeamien selvittämiseksi.

Kustannuksia on tarkasteltu sisäisen koron menetelmällä. Menetelmällä on helppo visualisoida investoinnin kannattavuus piirtämällä kannattavuus kuvaajaan, jossa y-akselina toimii energiansäästö ja x-akselina investointikustannus. Tällöin investoinnin sisäinen korko on kulmakerroin. Investoinnille valittu tuotto-odotus on menetelmässä origosta lähtevä suora, jonka kulmakerrointa jyrkemmän kulmakertoimen omaavat toimenpiteet ovat kannattavia ja loivemmat kannattamattomia. Työssä on myös tarkasteltu investointien ketjuttamista, jolloin kannattavampi investointi saattaa mahdollistaa kannattamattoman investoinnin toteuttamisen.

Suuntaa antavien kustannusten selvittämiseen työssä käytettiin Haahtela & Kii-raksen Talonrakennuksen kustannustieto –kirjaa sekä Rakennustieto Oy:n Rakennusosien kustannuksia –kirjaa. Lisäksi haastateltiin suoraan yrityksiä.

Työn tuloksena löydettiin simulointimalli, joka kuvaa lähtötilannetta riittävällä tarkkuudella toimenpiteen suhteellisen energiansäästön selvittämiseksi. Työssä tarkastellut energiansäästötoimenpiteiden kannattavuus visualisoitiin myös esitellyllä menetelmällä ja todettiin etenkin patteriverkoston perussäädön ja ilmanvaihdon lämmön talteenoton asentamisen olevan kannattavia toimenpiteitä toisessa tarkastelluista kouluista. Toimenpiteitä ketjuttamalla oli mahdollista tehdä yksinään kannattamattomista investoinneista kannattavia.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

HARJU-SÄNTTI, ERKKA: Estimating the profitability of energy saving investments in school buildings

Master of Science Thesis, 95 pages, 9 Appendix pages

October 2011

Major: Building Services engineering

Examiner: Professor Timo Kalema

Keywords: Energy efficiency, IDA, schools, simulation, profitability, cost

This thesis is part of a research “Improving the energy efficiency in public buildings” that is been carried out in the department of Mechanics and Design at Tampere University of Technology. The research project began in 2009 and is going to end in November 2011. The aim of the project has been to deliver for communal policy-makers useful information and tools for investigating the level of energy efficiency of the public buildings and means for improving it.

This thesis concentrates on researching the cost-effectiveness of energy saving investments. The purpose of this paper has been to find/describe an as easy method as possible for investigating the energy saving potential and the profitability for energy saving investments in school buildings. In total, seven different energy saving measures are studied in two different school buildings. These two school buildings are part of the research mentioned above. There were also an extensive set of different measurements in these schools more of which will be explained in the thesis of Eerik Mäkitalo.

IDA-ICE simulation software was used for finding out the energy saving potential. There were several different sets of simulation models built with the program in order to find the best suitable model for the needs of this research. All of the above mentioned energy saving measures were simulated with all of these simulation models in order to study the differences between each model.

The costs of the energy saving measures of this research were studied using a method that utilizes the internal rate of return. With this method it was easy to visualize the cost-effectiveness by drawing each procedure to a graph on which the energy saving potential acts as y-axis and the investment cost as x-axis. This way the slope of the line indicates the cost-effectiveness. The wanted return rate for the investment is a line that starts from origin (zero) and all the investments that have steeper slopes than the reference value are cost-effective. Slopes lower than the reference value are unprofitable. Also an option of chaining different investments was considered. That way a cost-effective investment can make an unprofitable one also worthwhile.

Approximate costs for each investment were estimated by using Haahtela & Kiira's book Talonrakennuksen kustannustieto and Rakennustieto Oy's book Rakennusosien kustannuksia. Also, suppliers and contractors were directly interviewed.

As a result of the thesis a simulation model was found that describes the starting circumstances and each energy saving measure with sufficient accuracy. All the investments were visualized with the above mentioned method. It was found that balancing the heating system and installing heat recovery to ventilation system were clearly cost-effective measures for one of the schools. Also chaining the procedures was found to be profitable.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktitekniikan laitokselle osana Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen –projektia.

Haluan kiittää esimiestäni Jari Rintamäkeä, työn tarkastajana ja ohjaajana toiminutta professori Timo Kalemaa sekä projektin päätutkija Eerik Mäkitaloa korvaamattomista neuvoista ja vinkeistä työhöni liittyen.

Haluan myös kiittää perheeni - ja olosuhteiden - järjestämiä muutamia maatilaskareita, jotka auttoivat viikonloppuisin irtaantumaan tutkimustyöstä. Kiitos myös ystävilleni tuesta ja kannustuksesta.

Aber ehrlich gesagt, hat mir meine Freundin Ina die größte Motivation zu dieser Arbeit gegeben. Danke für alles Schatzi!

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto.....	1
2 Koulujen energiansäästö.....	3
2.1 Koulujen ilmanvaihtojärjestelmät	3
2.2 Ilmanlaatu	5
2.2.1 Koulujen ilmanvaihto	5
2.2.2 Sisäilman laadusta yleisesti.....	6
2.3 Energiansäästötoimenpiteet korjausrakentamisessa.....	8
2.3.1 Vaipan lisälämmöneristys	9
2.3.2 Ikkunoiden kunnostus tai vaihto.....	10
2.3.3 Ilmanvaihto	12
2.3.4 Lämmitysjärjestelmä.....	15
2.3.5 Valaistus.....	17
2.4 Energiatehokkuus	18
2.4.1 Energiatodistus	18
2.4.2 Energiatehokkuusluvun määrittäminen	19
2.4.3 Energiatehokkuusluokat.....	20
2.5 Esimerkkiprojekteja.....	21
2.5.1 Oulunjoen ala-asteen ilmanvaihdon perusparannus	22
2.5.2 Wausau West High Schoolin perusparannus	23
2.5.3 Egebjergin, Enghøjskolen ja Vridsløselillen koulujen perusparannukset Tanskassa	24
3 Tutkittavien koulujen lähtötilanne	26
3.1 Case-tapaukset.....	26
3.1.1 Koulu A.....	26
3.1.2 Koulu B.....	27
3.2 Simulointimallit.....	28
3.3 Koulun A simulointimallit	29
3.3.1 Yksityiskohtainen simulointimalli.....	29
3.3.2 Yksinkertainen simulointimalli	30
3.3.3 Rakentamismääräysten mukainen karkea malli	31
3.4 Koulun B simulointimallit	32
3.4.1 Yksityiskohtainen simulointimalli.....	32
3.4.2 Yksinkertainen simulointimalli	33
3.4.3 Rakentamismääräysten mukainen karkea malli	34
3.5 Energiansäästöinvestointien lähtötilanne.....	35
3.5.1 Koulu A.....	35
3.5.2 Koulu B.....	38
3.6 Simulointimallien vertailua.....	42

3.6.1	Koulu A.....	42
3.6.2	Koulu B.....	47
3.7	Lisätarkastelu jäähdytystarpeen mallintamiseen liittyvästä tyyppitilan valinnasta.....	51
4	Energiansäästöpotentialin selvittäminen.....	55
4.1	Koulun A energiansäästötoimenpiteet.....	55
4.1.1	Ikkunoiden uusiminen.....	56
4.1.2	Yläpohjan lisälämmöneristys.....	58
4.1.3	Toimenpiteiden yhdistäminen.....	59
4.2	Koulun B energiansäästötoimenpiteet.....	60
4.2.1	Ikkunoiden peruskorjaus ja tiivistys.....	62
4.2.2	Vaihtopuitteiden asentaminen ikkunoihin.....	63
4.2.3	Ikkunoiden uusiminen.....	64
4.2.4	Lämmön talteenoton lisääminen olemassa oleviin tuloilmakoneisiin.....	65
4.2.5	Ilmanvaihdon täydellinen uusiminen.....	66
4.2.6	Toimenpiteiden yhdistäminen.....	68
4.3	Yhteenveto ja johtopäätökset koulujen energiansäästötoimenpiteistä ja simulointimalleista.....	70
5	Energiatsehokkuuden parannusinvestointien kannattavuus.....	73
5.1	Sisäisen korkokannan menetelmä.....	73
5.1.1	Sisäinen korko ja diskonttaus.....	73
5.1.2	Käytettävät korkokannat.....	74
5.1.3	Käyttöiän ja uusintainvestointien merkitys.....	75
5.1.4	Menetelmän visualisointi.....	75
5.1.5	Kustannusten kohdistaminen.....	77
5.2	Koulun A energiansäästöinvestoinnit.....	78
5.2.1	Investointien vertailu.....	78
5.2.2	Yksittäisten investointien vertailua.....	79
5.2.3	Investointien ketjuttaminen.....	80
5.2.4	Ero korjattuun yksinkertaiseen malliin.....	81
5.3	Koulun B energiansäästöinvestoinnit.....	82
5.3.1	Perusinvestointien kustannukset.....	82
5.3.2	Investointien vertailu.....	83
5.3.3	Energiansäästöinvestoinnit erillisinä investointeina.....	84
5.3.4	Investointien ketjuttaminen.....	86
5.3.5	Ero korjattuun yksinkertaiseen malliin.....	87
6	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	89
	Lähteet.....	91
	Liitteet.....	96

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Huoneilman lämpötila	Ilman lämpötila mitattuna mistä tahansa oleskeluvyöhykkeeltä 1,1 m:n korkeudelta. (<i>Asumisterveysohje, 2003</i>)
Hygroskooppisuus	Aineen kykyä sitoa itseensä ilman vesihöyryä.
Ilmanvuotoluku	Rakennuksen ilmanvuotoluku, n_{50} (1/h), kertoo kuinka monta kertaa rakennuksen ilma ehtii vaihtua tunnin aikana 50 Pa paine-erolla. Nykyään yleisesti käytetään myös ilmanvuotolukua, q_{50} ($\text{m}^3/(\text{h m}^2)$), joka kertoo rakennuksen keskimääräisen vuotoilman samalla 50 Pa paine-erolla kokonaissämittojen avulla laskettua vaipan alaa kohti. (<i>D3 (2012), RakMK</i>)
Operatiivinen lämpötila	Se ”mustan”, tasalämpöisen tilan lämpötila, jossa nettolämpövirta (säteily ja konvektio) kehon ja ympäröivän tilan välillä on sama kuin tarkasteltavassa tilassa. Kuvastaa, yhdessä huoneilman lämpötilan kanssa, poikkeavien pintalämpötilojen vaikutusta ihmisen lämmöntunteeseen. (<i>Seppänen, 2008, s.13</i>)
Oleskeluvyöhyke	Huoneen osa, jonka alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta on 1,8 metrin korkeudella lattiasta ja sivupinnat ovat 0,6 metrin etäisyydellä seinistä tai vastaavista kiinteistä rakennusosista. (<i>Asumisterveysohje, 2003</i>)
Rakennuksen vaippa	Ne rakennuksen osat, jotka erottavat rakennuksen lämmitettävät tai jäähdytettävät tilat ulkoilmasta, maaperästä tai lämmittämättömästä tilasta. Esimerkiksi rakennuksen lämpimien tilojen väliseinät eivät ole vaipan osia. (<i>D3, RakMK</i>)
MSE-ikkuna	Kolmilasinen ja kaksipuitteinen ikkuna, jonka sisäpuitteessa on eristyslasi.
MSK-ikkuna	Sisään aukeava kolmilasinen ja kolmipuitteinen ikkuna, jossa keskimäinen puite on saranoitu kiinni sisäpuitteeseen.
MS-ikkuna	Sisään aukeava kaksilasinen ja kaksipuitteinen ikkuna.

Eristyslasi

Kahdesta tai useammasta lasista koostettu kaasutiivis elementti, jossa lasit on kiinnitetty toisiinsa reunoistaan välilistojen ja saumaussmassan avulla. Lasien välissä on ilmaa tai muuta kaasua. Lasien välinen etäisyys on tavallisimmin 9-16mm.

1 JOHDANTO

Euroopan komissio on tiedonannossaan uudesta energiatehokkuussuunnitelmasta kertonut ehdottavansa julkisille rakennuksille 3 %:n vuotuista korjausvelvoitetta (*KOM(2011) 109*). Tämä on osa Euroopan laajuista energiansäästökampanjaa, jossa julkisten rakennusten halutaan esiintyvän roolimallina hyvän energiatehokkuuden suhteen muille toimijoille rakennusmarkkinoilla. Komission mukaan julkisessa käytössä olevien rakennusten osuus Euroopassa on noin 12 % rakennuskannasta, jota voidaan pitää kohtuullisen merkittävänä.

Suomen rakennuskanta vuonna 2005 oli 520 miljoonaa rakennusneliömetriä. Tästä noin 9 %, eli 45-47 milj. m^2 , oli valtion ja kuntien omistamaa rakennuskantaa. Kuntien osuus julkisesta rakennuskannasta on noin 75 %, eli noin 35 milj. m^2 . (*Heljo & Nippala, 2007, s. 20*) Kuntien rakennuskannasta puolestaan noin 29 % on opetusrakennuksia (*Ruokojoki, 2009, s. 18*). Kun vielä huomioidaan, että rakennukset kuluttavat Suomessa yhteensä 41 % primäärienergiasta (*Vehviläinen et al., 2010*) niin voidaan todeta, että opetusrakennukset ovat Suomessa yksi energiansäästön näkökulmasta huomattavan potentiaalin omaavista kohteista.

Energiansäästöpotentiaali voidaan jakaa karkeasti neljään erilaiseen osa-alueeseen:

- Välinpitämättömyydestä tai tietämättömyydestä johtuvan tuhlauksen vähentämiseen
- Konkreettisten vikojen poistamiseen toimivista säätö- ja ohjauslaitteista
- Rakennuskannan korjaamiseen
- Uudistuotannon parantamiseen

Tämä diplomityö on osa Tampereen teknillisen yliopiston konstruktitekniikan ”Julkisten rakennusten energiatehokkuuden parantaminen”-projektia. Projektin tavoitteena on ollut löytää kunnallisille päättäjille helppoja keinoja arvioida julkisten rakennusten energiatehokkuutta kyselytutkimuksen, kunnallisten energiankulutuskartoitusten ja kahden tarkemman case-tapauksen tutkimusten avulla. Kyselytutkimuksen avulla on koetettu löytää keinoja tietämättömyydestä ja välinpitämättömyydestä johtuvan tuhlauksen vähentämiseksi. Tutkimuksen aikana on käynyt ilmi, että yllättävän usein tietämättömyys säätölaitteiden toiminnasta on suurempi energiantuhlaukseen vaikuttava tekijä kouluissa kuin mahdollinen itse säätö- ja ohjauslaitteiden toimimattomuus. Asia voidaan ratkaista parantamalla koulun järjestelmäautomaatiota, mutta toinen kyselytutkimuksen perusteella selvinnyt erittäin varma tapa on henkilöstön energiansäästöön liittyvän motivaation kasvattaminen erilaisten kannustusjärjestelmien avulla.

Tässä diplomityössä keskitytään etsimään mahdollisimman yksinkertaista keinoa, jonka avulla pystytään arvioimaan rakennuksen energiansäästöinvestointien kannattavuuksia. Energiansäästöpotentiaalia arvioidaan tekemällä kahdesta esimerkkikoulusta erilaisia simulointimalleja IDA-ICE simulointiohjelman avulla. Eri simulointimalleja vertaillaan sen selvittämiseksi miten tarkkoja tuloksia ne antavat suhteessa toisiinsa ja todelliseen tilanteeseen. Työn tarkoituksena on löytää yksinkertainen simulointimalli, jonka avulla voidaan saada riittävän luotettavaa tietoa investoinnin energiansäästöpotentiaalista. Selvitetyt energiansäästöpotentiaalin lisäksi tarkastellaan investoinnin kannattavuutta niin sanotun sisäisen korkokannan menetelmällä. Sen avulla voidaan yksinkertaisesti ja havainnollisesti visualisoida eri investointien kannattavuudet taulukkoon, jonka kulmakerroin kertoo investoinnin kannattavuuden.

2 KOULUJEN ENERGIAANSÄÄSTÖ

2.1 Koulujen ilmanvaihtojärjestelmät

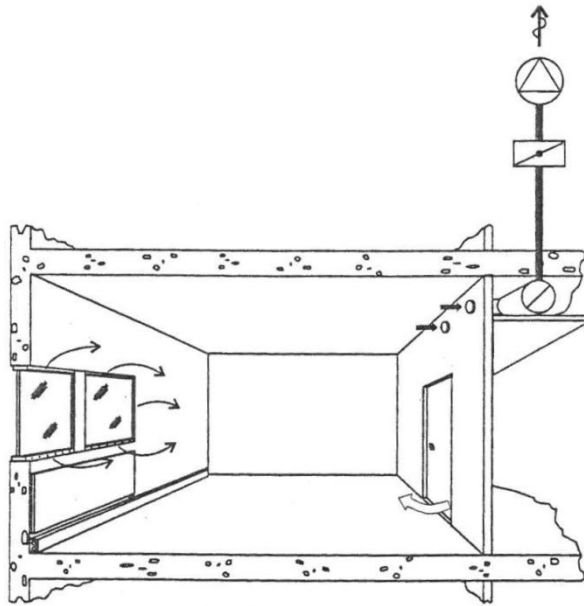
Ilmanvaihtojärjestelmät jaotellaan yleensä käyttövoiman perusteella painovoimaiseen ilmanvaihtoon ja koneelliseen ilmanvaihtoon perustuviin järjestelmiin. Ennen vuotta 1945 oli kaikissa suomalaisissa kouluissa käytössä painovoimainen ilmanvaihto. Painovoimainen ilmanvaihto perustuu ilman tiheyseroon rakennuksen sisä- ja ulkopuolella sekä tuulen vaikutukseen. Tiheysero saa aikaan niin sanotun termisen paine-eron joka puolestaan aiheuttaa ilmavirtauksen kohti pienempää painetta. Paine-ero voidaan yksinkertaisimmillaan johtaa ideaalikaasun tilanyhtälöstä:

$$\Delta p = \rho_s g h \frac{T_s - T_u}{T_u} \quad (2.1)$$

missä ρ_s on sisäilman tiheys (kg/m^3), h painovoimaisen hormin korkeus (m) ja T_s sekä T_u sisä- ja ulkolämpötilat (K) (*Alanne, 2010*). Paine-eroon perustuvan ilmanvaihdon vahvuuksia ovat äänettömyys, pieni investointi ja se, ettei se tarvitse sähköä toimiakseen. Paine-eroon perustuvan toiminnan heikkoutena ovat suuret kanavakoot ja se, ettei korvausilmasuodattimia, -lämmitystä tai lämmön talteenottoa voida käyttää. Lisäksi järjestelmä on herkkä ulkolämpötilan ja tuuliolosuhteiden vaihteluille. Painovoimaisen ilmanvaihdon avulla ei useimmiten saavuteta kouluissa riittäviä ilmanvaihtomääriä, jonka vuoksi joudutaan turvautumaan energiasäästöön ikkunatuuletukseen. Painovoimainen ilmanvaihto ei ole kovin suosittu Suomessa, mutta muissa pohjoismaissa ja Keski-Euroopassa tapaa painovoimaista ilmanvaihtoa osittain hyödyntäviä hybridi-ilmanvaihtojärjestelmiä.

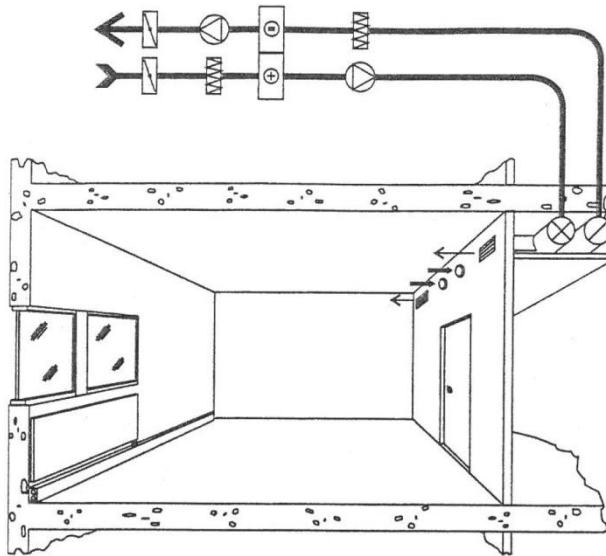
Koneelliseen ilmanvaihtoon perustuvissa järjestelmissä paine-ero rakennuksen sisä- ja ulkopuolen välillä tuotetaan puhaltimien avulla. Järjestelmät voidaan edelleen jakaa koneelliseen poistoilmanvaihtoon ja koneelliseen tulo- ja poistoilmanvaihtoon. Koneellinen poistoilmanvaihto alkoi yleistyä uudisrakennuksissa 1950-luvulla. Koneellinen poistoilmanvaihto on toimintaperiaatteeltaan hyvin painovoimaisen ilmanvaihdon tapainen. Korvausilma otetaan menetelmässä myös rakennuksen vaipan läpi. Katolle sijoitettavan huippuimurin ansiosta on kuitenkin mahdollista käyttää pienempiä kanavakokoja ja korvausilmasuodattimia eikä järjestelmä ole käytännössä lainkaan herkkä sään vaihteluille. Poistoilmakanavaan on myös mahdollista liittää lämmön talteenotto ns. poistoilmalämpöpumpun avulla. Lämpö voidaan ottaa talteen esimerkiksi käyttöveteen. Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä on investointikustannuksiltaan halpa eikä vaadi paljoa tilaa. Koneellisen poistoilmanvaihdon ongelmana puolestaan on kylmän

korvausilman aiheuttama vedon tunne. Lisäksi ilmakehanavat ja huippuimuri voivat tuottaa ääniongelmia.



Kuva 2.1. Koneellinen poistoilmanvaihto (Kurnitski et al., 1997).

Koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustettiin 30 % uusista kouluista vuosina 1955-1965. Tämän jälkeen on suurin osa uusista koulurakennuksista varustettu koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla. Menetelmässä myös tuloilma tuotetaan rakennuksen sisään puhaltimien avulla. Tällä tavoin on mahdollista ottaa poistoilman lämpö talteen suoraan tuloilmaan. Tuloilmaa voidaan lisäksi lämmittää tai jäähdyttää erillisen lämmitys- tai jäähdytyspatterin avulla. Lämpimän tuloilman käyttö vähentää vedon tunnetta ja mahdollistaa suurempien ilmavirtojen käyttämisen tiloissa. Muita järjestelmän etuja ovat varmatoimisuus ja helppo suunnittelu. Haittoja puolestaan ovat pelkkää poistoilmanvaihtoa suuremmat kustannukset ja suurempi sähkön kulutus. Puhallinmelu saattaa myös aiheuttaa ongelmia ilman kunnollista äänieristystä.



Kuva 2.2. Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto (Kurnitski et al., 1997).

Ilmanvaihtojärjestelmät voidaan jaotella myös hajautettuihin ja keskitettyihin järjestelmiin sen mukaan kuinka monen tilan kokonaisuutta ne rakennuksessa palvelevat. Keskitetyssä järjestelmässä yksi ilmanvaihtokone palvelee useamman tilan tarpeita keskitetysti. Rakenteensa takia keskitetty järjestelmä on helppo huoltaa ja käyttökustannukset ovat alhaisemmat kuin hajautetussa järjestelmässä. Lisäksi tuloilman lämmitys on helpompia ja taloudellisempiä hoitaa keskitetyssä järjestelmässä. Hajautetussa järjestelmässä puolestaan käytetään tilakohtaisia ilmanvaihtojärjestelmiä. Järjestelmän etuja ovat muun muassa tilakohtainen säätömahdollisuus ja joustavuus. Ongelmia hajautetuissa ilmanvaihtojärjestelmissä saattavat tuottaa ilmanvaihtokoneiden aiheuttama melu, huoltotoimenpiteiden suoritus sekä jälkilämmityksen järjestäminen.

2.2 Ilmanlaatu

2.2.1 Koulujen ilmanvaihto

Suomessa oli vuonna 2010 peruskouluja ja lukioita yhteensä 3 347 kappaletta. Kouluisa opiskeli yhteensä 676 100 oppilasta. Määrä on vähentynyt vuodesta 2005 660 koululla. (SVT, 2010a)

Koulujen määrän vähentyessä ja luokkakokojen kasvaessa on alettu kiinnittää enenevässä määrin huomiota koulujen sisäilman laatuun. Suurin sisäilman laatuun vaikuttava tekijä kouluissa on ilmanvaihto. Viimeisin koulujen sisäilmastoa käsitellyt laaja kysely on tehty Teknillisen korkeakoulun LVI-laboratorion vuonna 1996 tekemässä raportissa ”Koulujen sisäilmasto – rehtorikysely ja sisäilmastomittaukset”. Raportin materiaalina käytettiin 1264:lle yläasteen, ala-asteen tai lukion rehtorille lähetettyä kyselyä, johon vastauksia tuli 984 kappaletta. Kysely kattoi noin neljäsosan Suomen silloisesta koulujen lukumäärästä (noin 5000). Oppilasmäärällisesti mitattuna kysely kattoi kuitenkin noin puolet Suomen oppilaista. Kyselytutkimukseen osallistuneiden koulujen keskimääräinen oppilasmäärä oli noin 300 oppilasta kun se kyseisenä ajankohtana Suo-

men kouluissa keskimäärin oli 130-140 oppilasta. Kysely keskittyi siis suurempiin kouluihin. Tutkimus on 15 vuotta vanha ja koulujen lukumäärä on tutkimuksen jälkeen merkittävästi vähentynyt, mutta koska tutkimus keskittyi suurempiin kouluihin, voidaan olettaa sen olevan vielä vähintäänkin suuntaa antava. Kyselytutkimuksen tuloksena saatiin koulujen ilmanvaihdosta selville seuraavaa: painovoimaista ilmanvaihtoa käytti 10 %, koneellista poistoa 26 %, koneellista tuloa ja poistoa 47,7 % ja kahta tai useampaa ilmanvaihtojärjestelmää 14,9 % tutkimuksen kouluista. 1,4 % rehtoreista ei tuntenut koulunsa ilmanvaihtojärjestelmää ja lämmön talteenottoa käytettiin 31,4 prosentissa kouluista. Kyselytutkimuksessa kävi myös ilmi, että ilmanvaihtojärjestelmää huollettiin 41,7 %:ssa kouluista säännöllisesti, 39,1 %:ssa vian sattuessa ja 3,6 %:ssa ei huollettu lainkaan. Yhdeksällä prosentilla rehtoreista ei ollut tietoa ilmanvaihtojärjestelmän huolloista. Ikkunatuuletusta käytettiin säännöllisesti puolessa tutkimukseen osallistuneista kouluista. (Kurnitski et al., 1996)

Sisäilmasto-ongelmat liittyivät vetoon talvella, ilmanvaihdon riittämättömyyteen, ilman tunkkaisuuteen ja homeeseen. 42 % prosenttia koulujen rehtoreista piti ongelmana vetoa talvisin. Riittämätöntä ilmanvaihtoa puolestaan 40 % ja tunkkaista ilmaa 31 % rehtoreista. Näkyvää homeetta tai homeen hajua esiintyi 23 %:ssa kouluista. 70,3 % rehtoreista nimesi ilmanvaihdon sisäilmaongelmien syyksi. Ongelmallisena pidettiin myös suuria luokkakokoja. (Kurnitski et al., 1996)

Yhä edelleen jatkuva koulujen lukumäärän väheneminen kasvattaa koulujen luokkakokoja ja luo sisäilmaston laadulle uusia vaatimuksia jo olemassa olevissa kouluissa. Toisaalta, suuremmat yksiköt luovat myös mahdollisuuksia energian säästölle suunniteltaessa energiaremontteja olemassa jo oleviin kouluihin kunhan ilmanlaadulliset asiat pidetään mielessä.

2.2.2 Sisäilman laadusta yleisesti

Sisäilman laadulle on asetettu tiettyjä laatuvaatimuksia. Uusien rakennusten osalta vaatimukset on esitetty rakentamismääräyskokoelman osassa D2. Lisäksi ohjeita hyvän ilmanlaadun saavuttamiseksi on annettu muun muassa vuonna 2003 julkaistussa asumisterveysoppaassa ja 2008 julkaistussa uusimmassa sisäilmastoluokituksessa.

Asumisterveysopas on Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisema ohje kuntien terveydensuojeluviranomaisille. Ohje on tarkoitettu erityisesti asuntojen tarkastuksiin, mutta soveltuu myös oppilaitosrakennusten terveydellisten olojen selvitykseen. Asumisterveysoppaassa sisäilman laatu on jaettu lämpötilan ja vedon osalta välttävään ja hyvään tasoon. Lisäksi hiilidioksidipitoisuudelle on annettu välttävä pitoisuus sekä pitoisuus, jossa ilmanvaihtoa on lisättävä. Sisäilmastoluokitus puolestaan on Sisäilmastoyhdistyksen ja Rakennustietosäätiön julkaisema opas uudis- ja korjausrakentajille. Sisäilmastoluokituksessa sisäilman laatu on jaettu kolmeen tasoon: S1, S2 ja S3. Sisäilmastoluokka S1 kuvaa sisäilmanlaadullisesti parasta luokkaa, jonka saavuttaminen Suomen oloissa vaatii käytännössä koneellista jäähdytystä ja huonekohtaista lämpötilan säätöä. S2 luokan saavuttaminen voi olla jo mahdollista oikeanlaisella rakennesuunnittelulla ilman koneellista jäähdytystä. Luokassa S3, eli niin sanotussa tyydyttävässä sisäilmas-

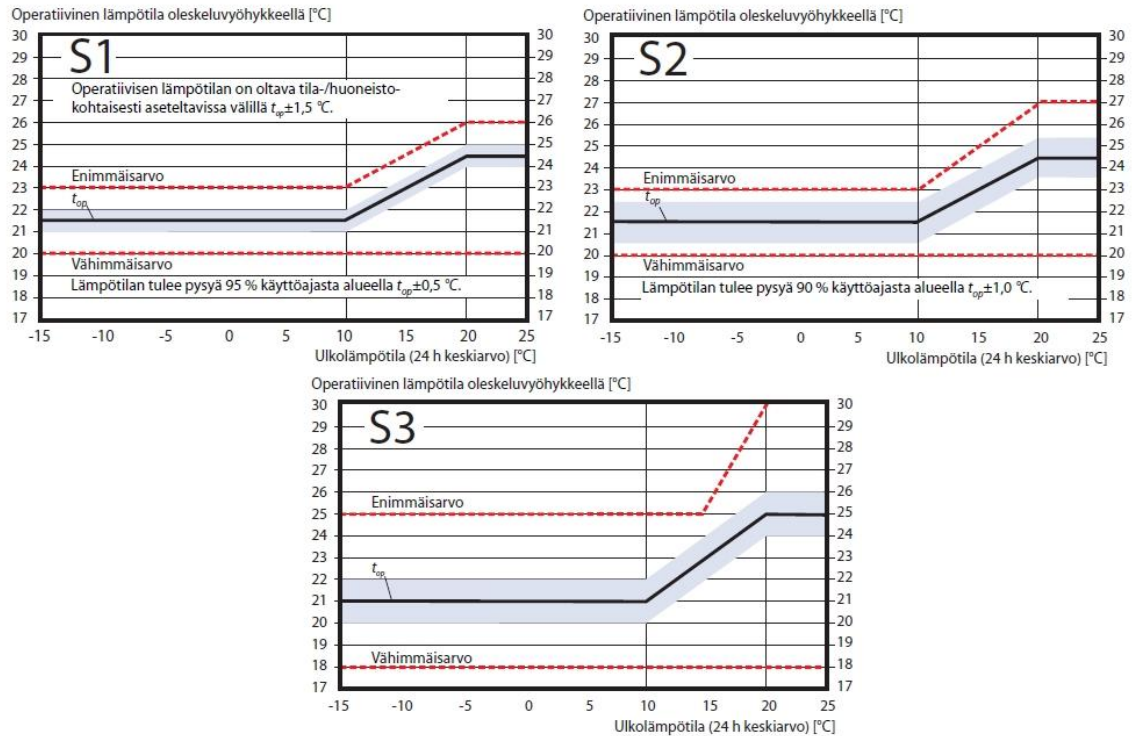
tossa, sisäilman lämpötila voi nousta korkeaksi auringonsäteilyn ja muiden kuormien vaikutuksesta. Luokka S3 täyttää rakentamismääräysten vähimmäisvaatimukset.

Taulukkoon 3.1 on koottu kaikkien kolmen lähteen ohjearvot hiilidioksidipitoisuudelle, lämpötiloille, vedolle ja äänitasoille.

Taulukko 2.1. Opetustilojen sisäilmastoa koskevat ohjearvot. (D2, RakMK; Asumisterveysohje, 2003; RT 07-10946)

	RakMK osa D2, YM	Sisäilmaohje, STM		Sisäilmastoluokitus, SIY		
		Välttävä taso	Hyvä taso	S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuus, ppm	<1200	<1500	<1200	<750	<900	<1200
Huoneilman lämpötila, °C	20-22	18	21			
Operatiivinen lämpötila, °C		19	20	21-22	20,5-22,5	20-22
Veto talvella, m/s (21°C)	0,2	0,23	0,18	0,14	0,17	0,2
Äänitaso, dB(A)/dB(max)	33/38	35	35	33	33	33

Rakentamismääräyskokoelmassa ohjearvot koskevat huoneilman lämpötiloja, kun taas sisäilmastoluokituksissa on asetettu vaatimuksia operatiivisille lämpötiloille. Kesäajan lämpötiloista rakentamismääräyskokoelmassa (D3, RakMK) todetaan, etteivät ne kesäkuukausina (1. kesäkuuta – 31. elokuuta) saa opetusrakennuksissa olla yli 25°C kauempaa kuin 150 astetuntia (asuinrakennuksissa vastaava lämpötila on 27°C). Sisäilmastoluokituksessa lämpötilan tulee S1-luokassa pysyä tavoitelämpötila-alueen sisällä 95 %, ja luokassa S2 90 %, ajasta. Kuvassa 2.3 on esitetty havainnollisesti operatiivisten lämpötilojen tavoitearvot ja sallitut poikkeamat kussakin luokassa. (Asumisterveysohje, 2003; RT 07-10946)



Kuva 2.3. Sisäilmastoluokituksen mukaiset tilojen operatiivisten lämpötilojen tavoitearvot ja sallitut poikkeamat eri laatuluokille. (RT 07-10946)

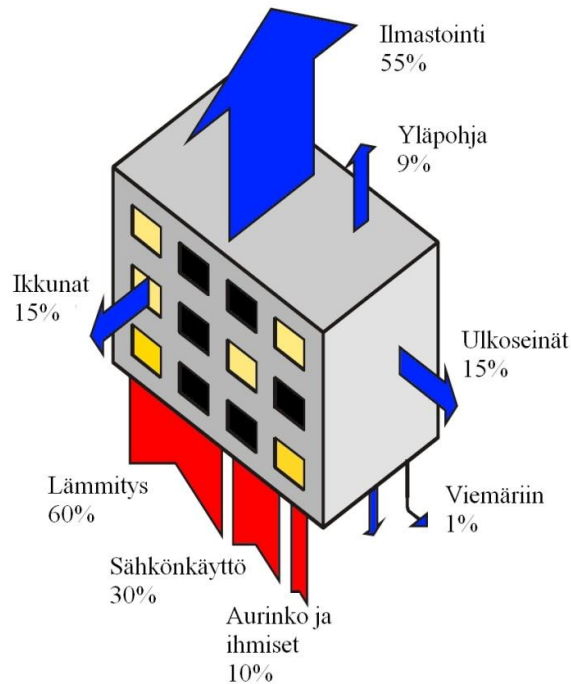
Vähimmäislämpötilat ovat S1- ja S2-luokissa 20 °C ja luokassa S3 18 °C. Sallittu enimmäislämpötila on S1- ja S2-luokissa talvella 23 °C. Kesällä S1-luokassa enimmäislämpötila on 26 °C, kun S2-luokassa sallitaan maksimissaan 27 °C:een sisälämpötila. S3-luokassa enimmäislämpötila sisällä voi talvella olla 25 °C ja kesällä maksimissaan 5 °C ulkolämpötilaa korkeampi.

2.3 Energiansäästötoimenpiteet korjausrakentamisessa

Euroopan unionin joulukuussa 2008 hyväksymään ja huhtikuussa 2009 julkaisemaan ilmasto- ja energiapakettiin sisältyy niin sanottu 20-20-20 –tavoite. Tämä tarkoittaa, että vuoteen 2020 mennessä tulisi EU:n saada energiastaan 20 prosenttia uusiutuvista energianlähteistä, päästöjen tulisi olla 20 prosenttia vuoden 1990 tasoa alhaisemmat ja energiatehokkuuden tulisi parantua 20 prosentilla. Tähän liittyen hyväksyttiin parlamentissa toukokuussa 2010 rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (2010/31/EU), joka velvoittaa EU-maat tiukentamaan rakentamismääräyksiään siten, että vuonna 2020 rakennettavat rakennukset ovat lähes nollaenergiarakennuksia. Direktiivi asettaa velvoitteita myös julkisten rakennusten energiankulutukselle ja vaatimus niiden osalta tulee olla täytettynä jo vuonna 2019.

Julkisten rakennusten energiankulutuksen osuus suomalaisen rakennuskannan energiankulutuksesta on merkittävä, joten energiansäästötoimenpiteitä on löydettävä. Merkittävimmät energiansäästökohteet ovat samoja kuin muissakin rakennuksissa: Vai-
pan lisälämmöneristys, ikkunoiden kunnostus/vaihto, ilmanvaihtoon ja lämmitysjärjes-

telmään liittyvät toimenpiteet sekä valaistusratkaisut. Kuvassa 2.4 on esitetty lämpövirrat ja niiden suhteet tyypilliselle suomalaiselle toimistorakennukselle.



Kuva 2.4. Tyypillisen toimistorakennuksen lämpöhäviöiden jakauma ja lämmitysenergianlähteet (Seppänen & Seppänen, 1996, s.60).

Koulujen lämpövirtojen voidaan olettaa olevan samankaltaisia. Kuva helpottaa eri lämpöhäviöiden suuruusluokkien hahmottamista. Seuraavassa on läpikäyty yleisimpiä energiansäästötoimenpiteitä rakennuksissa.

2.3.1 Vaipan lisälämmöneristys

Vaipan lämmöneristystä voidaan parantaa lisäämällä eristettä joko vaipan sisä- tai ulkopuolelle. Mikäli rakennus on esimerkiksi suojeltu tai sisäverhousta joudutaan muuten uusimaan, voi olla kannattavaa tehdä sisäpuolinen lisälämmöneristys. Tällöin on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota muun muassa vanhoihin höyrysulkuihin ja suunniteltava työ siten, ettei kosteus pääse tiivistymään seinärakenteissa vanhan ja uuden höyrysulun väliin. Tästä syystä joudutaan vanha, mahdollisesti huonokuntoinen höyrysulku, yleensä poistamaan lisäeristeen alta. Vaipan sisäpuolelta eristettäessä ongelmia tuottavat myös esimerkiksi betonisten väliseinien aiheuttamat kylmäsillat, joiden vaikutuksen poistaminen rakennuksen sisältä käsin on hankalaa. Sisäpuolinen lämmöneristys sopiikin parhaiten yksittäisten tilojen lisäeristykseen, ei niinkään koko rakennuksen eristämiseen.

Lisälämmöneristys rakennuksen ulkopuolelta on huomattavasti yksinkertaisempaa. Seinärakenteesta riippuen lisälämmöneristys toteutetaan purkamalla vanha ulkoverhous ja joko lisäämällä eristettä, tai vaihtamalla vanha eriste kokonaan uuteen. 60- ja 70-luvuilla yleistyneissä sandwich-betonielementeistä rakennetuissa rakennuksissa lisälämmöneristys toteutetaan purkamalla betoninen ulkokuori (siinä tapauksessa, että

sisäkuori on kantava), jonka jälkeen lämmöneriste voidaan vaihtaa uuteen. Verhousvaihtoehtoja on useita. Yksinkertaisimmillaan verhous voidaan toteuttaa kevytrappauksena uuden eristeen pintaan. Eriste voidaan myös pellittää tai verhota muulla tarkoitukseen sopivalla materiaalilla. Verhous voidaan toteuttaa myös uudella betonisella ulko-kuorella tai esimerkiksi tuulettuvalla julkisivumuurauksella. Rapatun tiili- tai harkko-seinän tapauksessa lisälämmöneristys voidaan asentaa vanhan seinän pintaan ja toteuttaa uusi rappaus kiinnittämällä eristeen pintaan teräsverkko, joka estää uuden rappauksen halkeilut. Puurunkoisissa rakennuksissa lisälämmöneriste asennetaan poistamalla ulkoverhous, jonka jälkeen uusi eriste voidaan asentaa joko koolaten tai erillisillä mekaanisilla kiinnikkeillä. Vanha tuulensuoja voidaan jättää uuden eristekerroksen alle, kunhan rakenne läpäisee tarpeeksi hyvin vesihöyryä. Ongelmakohtia vaipan lisäeristämisen osalta ovat ikkunoiden ja ovien ympäristät, joissa ei ole tilaa paksulle lisäeristeelle. Erityisesti sandwich-betonielementtien osalta ne jätetään usein eristämättä, koska ulkokuoren leikkaaminen ei rakenteellisista syistä usein ole mahdollista. Tällaisissa paikoissa on mahdollista käyttää niin sanottuja vakuumieristeitä (*vacuum insulated panel, VIP*), mutta ne ovat hinnoiltaan useisiin kohteisiin vielä liian kalliita. (Holopainen et al., 2007; Kallio, 2010; Kouhia et al., 2010)

Alapohjan lisälämmöneristys on lähes poikkeuksetta kannattamatonta. Maanvaraisessa lattiassa ainoa kannattava tapa lisäeristykselle on lisätä lämmöneristettä lattian päälle, mutta tämä ei tule useinkaan kysymykseen, koska toimenpide nostaa lattian tasoa. Perusmuurin tai sokkelin ulkopuolisen routaeristeen lisääminen vähentää kuitenkin myös alapohjan lämpöhäviöitä ja saattaa olla yksi kannattava toimenpide. Yläpohjan lämmöneristys sitä vastoin on yleensä helpompaa. Ullakkotilaisissa rakennuksissa voidaan lisäeriste asentaa puhaltamalla tai levytavarana. Eristeen paksuutta rajoittaa räystäiden tuuletusaukkojen pysyminen auki sekä ullakkotilan korkeus. Tasakattoisissa rakennuksissa yläpohjan lisäeristys voidaan tehdä vain vesikatetta uusittaessa. (Holopainen et al., 2007)

Ullakkotilaan rajoittuvaa yläpohjaa lukuun ottamatta vaipanlisälämmöneristys on kannattavaa ainoastaan, jos vaippaa joudutaan muutenkin remontoimaan. Esimerkiksi julkisivuremontin tai tasakattoisen rakennuksen vesikattoremontin yhteydessä saattaa olla kannattavaa lisätä eristettä. (Holopainen et al., 2007)

2.3.2 Ikkunoiden kunnostus tai vaihto

Ikkunoiden läpi tapahtuva lämpövuoto rakennuksessa voi, huomattavasti seiniä huonomman lämmönläpäisykertoimen vuoksi, olla samaa luokkaa kuin seinien lämpöhäviö, vaikka ikkunapinta-ala on rakennuksissa yleensä huomattavasti seinäpinta-alaa pienempi. Tästä syystä ikkunat ovat houkutteleva kohde energiansäästökorjausta suunnitellessa.

Yksinkertaisin toimenpide ikkunoiden energiatehokkuuden parantamiseksi ja käyttöiän pidentämiseksi on kunnossapitokorjaus. Kunnossapitokorjaus sisältää toimenpiteitä, joissa ikkunan rakenne pysyy entisellään. Tällaisia toimenpiteitä ovat esimerkiksi tiivisteiden uusinta, lasituskittaukset, karmien maalaus- ja vesipeltien kun-

nostus. Kunnossapitokorjauksen tavoite on palauttaa ikkunan ominaisuudet lähelle alkuperäistä tasoa – energiatehokkuudessa alkuperäistä paremmalle tasolle kunnossapitokorjauksella ei päästä.

Mikäli tavoitteena on ominaisuuksien parantaminen alkuperäisestä, voidaan ikkunoiden osalta päätyä osittaiseen uusimiseen. Tähän on kolme vaihtoehtoa:

- lisäpuitteen asentaminen
- ulkopuitteen vaihto uuteen
- lasin korvaaminen eristyslasilla

Osittaiseen uusimiseen liittyy samoja toimenpiteitä kuin kunnossapitokorjaukseenkin, esimerkiksi tiivisteiden uusintaa, lahovaurioiden paikannusta ja maalauskorjauksia. Vanhan lasin korvaaminen eristyslasilla on mielekäs vaihtoehto ainoastaan silloin, kun puuosien säilyttämisellä saavutetaan jokin erityisarvo – esimerkiksi vanhassa rakennuksessa arvoikkunoiden lämmöneristävyyden parantaminen. (*Hemmilä & Saarni, 2001*)

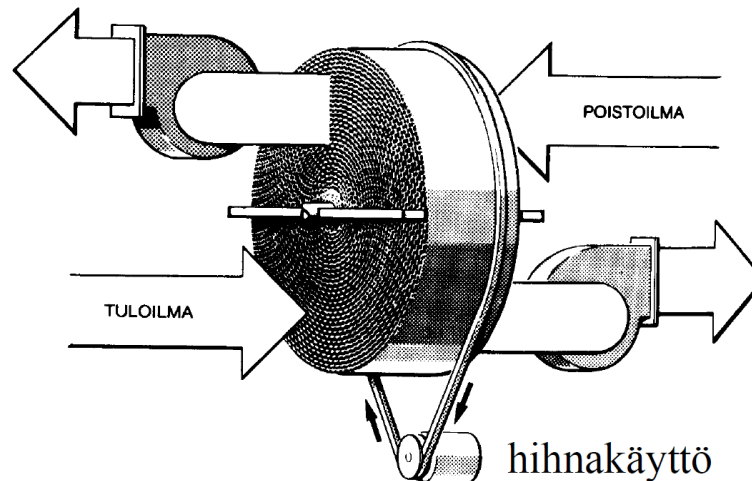
Lisäpuitteen asentaminen tarkoittaa korjaustapaa, jossa kaksilasiseen ikkunaan asennetaan alumiininen ulkopuite. Vanhaa ulkopuitettä ei poisteta, vaan uusi ulkopuite tulee vanhan päälle, joten ikkunalasien lukumäärä kasvaa. Lisäpuitteenvaihtoehto parantaa ikkunan lämmön- ja ääneneristävyyttä. Lisäksi vanhan ikkunapuitteen vaurioituminen pysähtyy, kun se peitetään uudella alumiinisella. Tällöin vanha rakenne pääsee kuivumaan, eikä UV-säteily enää rasita ikkunan pinnoitettuja puuosia. Lisäpuitteen asennus sopii erityisesti kaksilasisten MS-ikkunoiden uudistamiseen. Lisäpuitetta asennettaessa on huomioitava, että se kasvattaa ikkunarakenteen paksuutta. Lisäksi on varmistettava, että sekä vanha karmi että puitteet ovat riittävän hyvässä kunnossa. Vaihtopuitekorjaus puolestaan tarkoittaa menetelmää, jossa ikkunan vanha ulkopuite vaihdetaan uuteen. Tällöin ulkopuitteen kunnolla ei ole väliä, sillä se korvataan uudella alumiinipuitteella. Menetelmää käytetään yleensä kolmilasisten MSK-ikkunoiden korjaamiseen. Lasivaihtoehtojen avulla voidaan molemmissa korjausmenetelmissä määritellä uusi lämmöneristystaso valitsemalla tavallisen float-lasin ja eristyslasin väliltä. Molemmat korjausmenetelmät sopivat parhaiten korjausprojekteihin, joissa ulkoseinän paksuus kasvaa, esimerkiksi lisälämmöneristyksen vuoksi. Tällöin korjattu, paksumpi ikkunarakenne ei jää syvennykseen. (*Haukijärvi, 2005; Hemmilä & Saarni, 2002*)

Mikäli ikkuna on vaurioitunut tai muutoin käyttöominaisuuksiltaan heikentynyt niin paljon, ettei kunnostaminen kannata, ainoana vaihtoehtona on ikkunoiden uusiminen. Tällöin vanha ikkuna poistetaan karmeineen. Menetelmän etuna on, että uusi ikkunarakenne voidaan valita täysin vapaasti. Haittana puolestaan on pelkkää korjaustöiden pidettä huomattavasti korkeampi hinta. Yleisin valittava rakenne on alumiinisella ulkopuitteella varustettu MSE-ikkuna, jossa sisäpuitteessa on eristelasi. (*Haukijärvi, 2005*)

2.3.3 Ilmanvaihto

Ilmanvaihto on suurin yksittäinen energiankuluttaja rakennuksessa. Siihen sisältyy myös suurin energiansäästöpotentialiaali. Se perustuu lähinnä lämmön talteenoton parantamiseen tai käyttöönottoon, mikäli sitä ei vielä entuudestaan ole. Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon käyttöönotolla on saatavissa myös huomattavia säästöjä kohteissa, joiden käyttöaste vaihtelee. (Alanne, 2010)

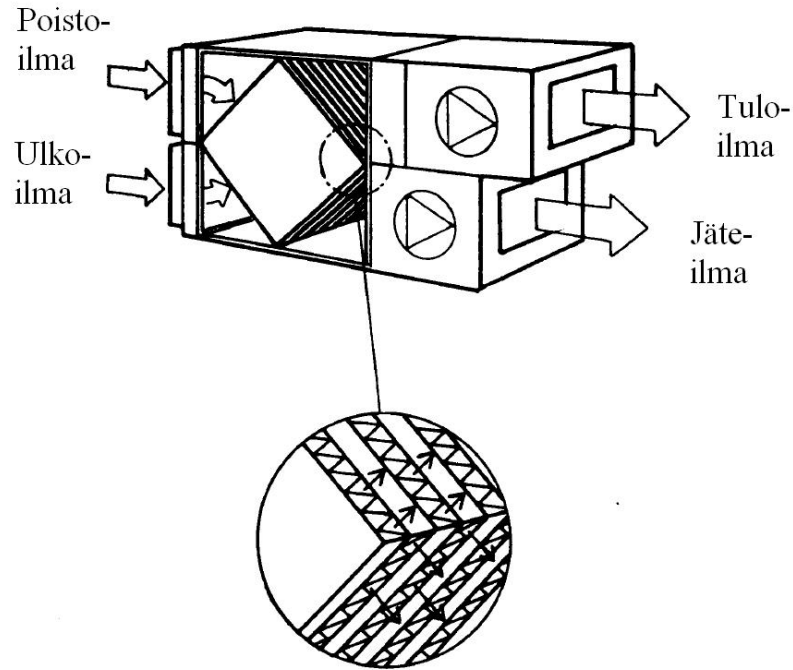
Lämmön talteenotto voidaan jakaa kahteen eri menetelmään: rekuperatiiviseen ja regeneratiiviseen lämmön talteenottoon. Regeneratiivinen lämmön talteenotto perustuu lämmön varastointiin massaan, jonka läpi sekä tulo että poistoilmavirta virtaavat luovuttaen ja vastaanottaen energiaa. Massa voi olla kiinteä, jolloin virtausta massan läpi muutetaan aika-ajoin, mutta yleensä käytetään niin sanottua pyörivää kiekkoa, jonka läpi virtaukset kulkevat molemmat omissa kanavissaan.



Kuva 2.5. Regeneratiivinen pyörivä lämmön talteenotto (Seppänen, 2008, s.288).

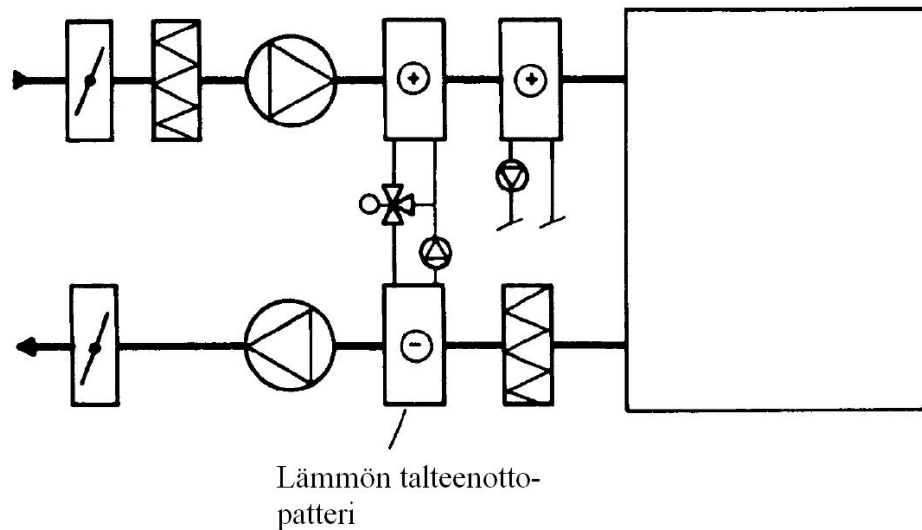
Pyörivän lämmön talteenoton avulla on mahdollista saavuttaa 80 % lämmön talteenotto. Lisäksi poistoilmasta voidaan siirtää kosteutta tuloilmaan hygroskooppisen roottorin avulla. Tämä parantaa osaltaan huoneilman laatua talvisin, kun ulkoilman kosteus on matala. (Alanne, 2010)

Rekuperatiivisessa lämmönsiirrossa ilmavirtaukset eivät sekoitu, vaan lämpö siirtyy väliaineen välityksellä, tai suoraan johtumalla jonkin materiaalin läpi, ilmavirtauksesta toiseen. Tästä syystä se voidaan edelleen jakaa *suoraan* tai *epäsuoraan lämmönsiirtoon*. Suora rekuperatiivinen lämmönsiirto perustuu useimmiten niin sanottuun levylämmönsiirtimeen, jossa poistuva ilma luovuttaa lämpöä sisään virtaavalle ulkoilmalle levyn läpi.



Kuva 2.6. Rekuperatiivinen suora lämmön talteenotto (Seppänen, 2008, s.287).

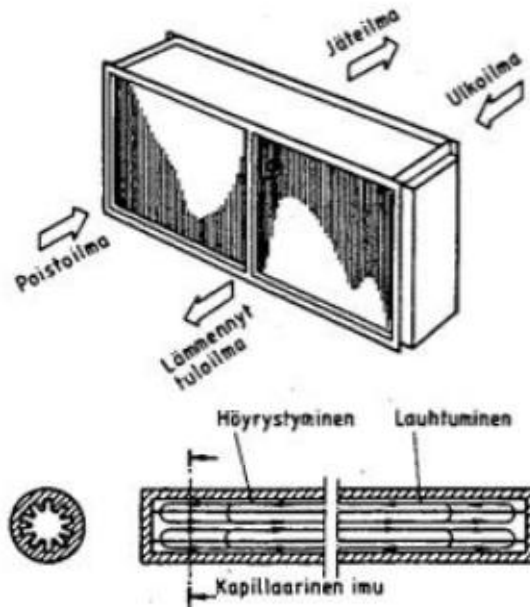
Levylämmönsiirtimen avulla voidaan saavuttaa 50-70 % lämmön talteenotto riippuen lämmönsiirtoalasta. Epäsuora rekuperatiivinen lämmönsiirto perustuu lämmön siirtämiseen erillisen kiertävän nesteen avulla. Lämpö siirtyy kiertoaineeseen ilmanavassa olevan lämmön talteenottopatterien (lamellipatteri) avulla. Menetelmän lämpötilahyötysuhde on luokkaa 45-60 %. (Alanne, 2010)



Kuva 2.7. Rekuperatiivinen epäsuora nestekiertoinen lämmön talteenottojärjestelmä (Seppänen, 2008, s. 287).

Epäsuora rekuperatiivinen lämmönsiirto voi perustua myös faasimuutokseen. Tyypillisiä faasimuutokseen perustuvia lämmönsiirtomenetelmiä ovat lämpöpumput ja lämpöputkilämmönsiirtimet. Lämpöputkilämmönsiirtimet perustuvat kylmäaineen höyrys-

tymiseen ja lauhtumiseen suljetussa piirissä, jossa ei ole kompressoria. Kylmäaineen saa kiertämään nesteen ja höyryn tiheysero sekä kapillaari-ilmio. Höyrystimen ja lauhtuttimen on menetelmässä sijaittava toisissaan kiinni luontaisen kierron mahdollistamiseksi. Menetelmän etuna on se, ettei siinä ole liikkuvia osia ja hyötysuhde on melko suuri, 50-80 %.



Kuva 2.8. Lämpöputkilämmönsiirrin. Toisin kuin muissa nestekiertoisissa lämmöntalteenottojärjestelmissä, lämpöputkilämmöntalteenotossa ilmakehanavat eivät voi sijaita kaukana toisistaan. (Seppänen, 2008, s.288)

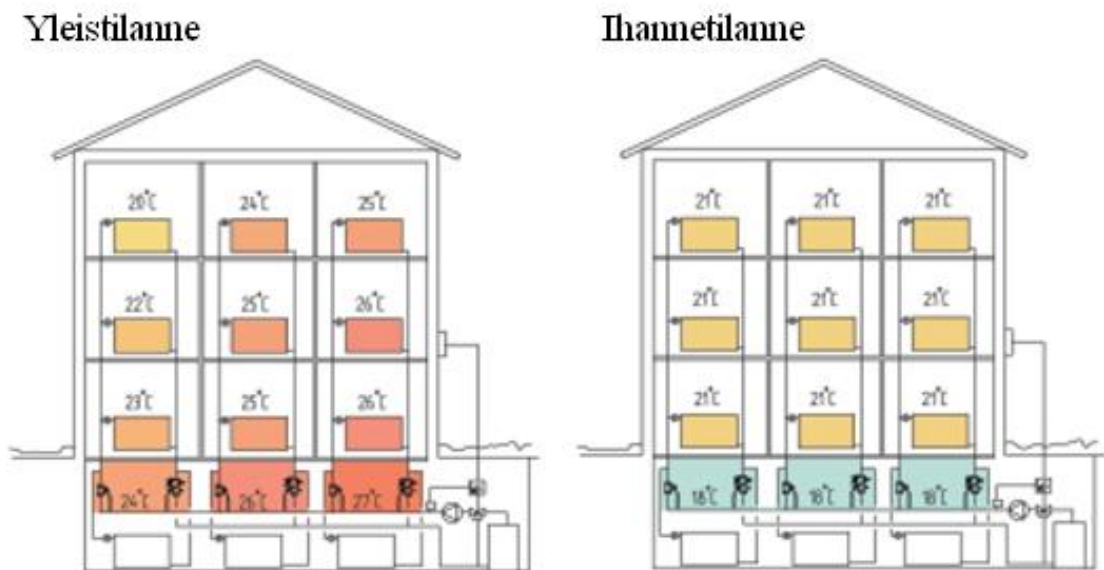
Toinen faasimuutokseen perustuva lämmön talteenottomenetelmä on lämpöpumppu. Sen toimintaperiaate on lämpöputken tapainen, mutta kierto perustuu kompressorin avulla pakotettuun kiertoon. Kuristusventtiilin ja kompressorin avulla voidaan säätää lämmön talteenoton lämpötilatasoja siten, että lämpöä voidaan ottaa talteen esimerkiksi poistoilmanvaihdon tapauksessa myös käyttöveteen. Menetelmän etuna on myös, että tulo- ja poistokanavat voidaan sijoittaa eri puolille rakennusta. Tämä onkin yksi epäsuoran rekuperatiivisen lämmönsiirtimen suurimmista eduista korjausrakentamisessa, sillä se on muunneltavuutensa ansiosta helppo asentaa jo olemassa oleviin ilmanvaihtojärjestelmiin ilmanvaihtoremontin yhteydessä. (Alanne, 2010; Seppänen, 2008)

Tarpeenmukainen ilmanvaihto on hyvä energiansäästökeino kohteissa, jotka ovat usein vajaakäytöllä, kuten esimerkiksi liikuntasalit ja luokka- sekä toimistohuoneet. Huoneilman hiilidioksidipitoisuus kuvaa hyvin tarkasti huoneessa olevien ihmisten määrän, joten yksi erinomainen tapa ohjata ilmanvaihtoa on hiilidioksidipitoisuuteen perustuva ohjausmenetelmä. Hiilidioksidipitoisuuteen perustuva ilmanvaihdon ohjaus vähentää ilmanvaihtoa tiloissa, joissa on vähän käyttöä ja ohjaa lisää ilmaa tiloihin, joissa käyttöaste on korkeampi. Menetelmä on melko uusi, joten kokemuksia ohjauksen toimivuudesta on vielä vähän, mutta säästöpotentiaali on kuitenkin todettu kohtuullisen suureksi. (Alanne, 2010)

2.3.4 Lämmitysjärjestelmä

2.3.4.1 Patteriverkoston perussäätö

Patteriverkoston säätö on vesikeskuslämmitteisille rakennuksille tehtävä toimenpide. Sen tarkoitus on virittää verkosto toimimaan suunnitellulla tavalla siten, että jokaisessa tilassa on virityksen jälkeen tasainen, toivottu lämpötila. Patteriverkoston säätö on yksi halvimmista ja yksinkertaisimmista keinoista pienentää energiankulutusta kohteissa, joissa patteriverkoston on todettu olevan epätasapainossa. Säätö tulee tehdä aina muiden huoneen lämpöhäviöön vaikuttavien säätöjen, kuten ilmanvaihdon perussäädön ja ikkunoiden tiivistyksen jälkeen. (Seppänen, 1995)



Kuva 2.9. Rakennus ennen patteriverkoston perussäätöä ja sen jälkeen (Motiva, 2002).

Säätö tapahtuu systeemin laajuudesta riippuen joko patteri- ja linjasäätöventtiileitä säätämällä, tai pelkästään patteriventtiileitä säätämällä. Vanhoissa, painovoimaisiksi suunnitelluissa järjestelmissä, joissa on suuret putkikoot, voi linjasäätöventtiilien käyttö jopa huonontaa järjestelmän tehokkuutta. Säätö toteutetaan useimmiten linjojen paine-eroja meno- ja paluulinjassa seuraamalla, ns. paine-eromenetelmällä. Toinen tapa on tehdä säätö lämpötilojen avulla, mutta tämä on huomattavasti hitaampi tapa. Oikein suoritettuna perussäädön tuloksena voidaan laskea menoveden lämpötilaa, koska tehonjako on tasaisempi. Tällöin myös verkoston lämpöhäviöt pienenevät. (Seppänen, 1995; Kärkkäinen, 2010)

2.3.4.2 Lämmitysjärjestelmän vaihto/uusinta

Lämmitysjärjestelmän vaihdolla ei yleensä voida vaikuttaa rakennuksen energiankulutukseen, mutta ostoenergiankulutusta voidaan pienentää. Esimerkiksi siirtymällä sähkölämmitystalossa maalämpöön voidaan sähkönkulutusta pienentää huomattavasti. Myös aurinkolämmön hyödyntäminen esimerkiksi käyttöveden lämmityksessä pienentää ostoenergian tarvetta.

EU:n energiansäästötavoitteen vuoksi lämmitysjärjestelmien valintaa ohjataan myös poliittisesti. Esimerkiksi Suomessa, uusissa rakentamismääräyksissä käyttöönotettavat primäärienergiakertoimet on yksi keino ohjata kuluttajien lämmitysjärjestelmävalintoja asetettujen päästö- ja energiansäästötavoitteiden suuntaan. Taulukko 2.2 kuvaa suomalaisen rakennuskannan jakautumista eri lämmitysaineiden perusteella.

Taulukko 2.2. *Rakennuskanta (lukumäärä) energianlähteen mukaan (SVT, 2010c).*

Energianlähde	Vuosi				
	1970	1980	1990	2000	2010
Kauko- /aluelämpö	..	48 538	105 608	130 946	164 721
Öljy, kaasu	320 171	347 498	306 750	320 934	322 279
Sähkö	41 872	178 707	357 743	455 752	554 368
Kivihiili, koksi	24 328	11 794	8 753	7 986	6 983
Puu, turve	429 467	327 230	321 342	292 763	277 553
Muu, tuntematon	22 111	20 578	62 214	91 243	120 192
Kaikki rakennukset	837 948	934 845	1 162 410	1 299 490	1 446 096
Kauko- /aluelämpö	..	5,2	9,1	10,1	11,4
Öljy, kaasu	38,2	37,2	26,4	24,7	22,3
Sähkö	5	19,1	30,8	35,1	38,3
Kivihiili, koksi	2,9	1,3	0,8	0,6	0,5
Puu, turve	51,3	35	27,6	22,5	19,2
Muu, tuntematon	2,6	2,2	5,4	7	8,3
%	100	100	100	100	100

Taulukko ei sisällä kesämökkejä, eikä maatalous- eikä muita talousrakennuksia (SVT, 2010c). Siitä ei voida päätellä kulutettuja energiamääriä, sillä rakennusten kokoja ei tunneta. Esimerkiksi kaukolämpöä kuluu selvästi enemmän kuin taulukon suhdeluku antaa ymmärtää, sillä kaukolämmön piirissä olevat rakennukset ovat keskimäärin huomattavasti suurempia kuin esimerkiksi sähkölämmitetyt rakennukset. Taulukosta voidaan kuitenkin päätellä lämmönlähteisiin liittyviä trendejä vuosikymmenten välillä. Taulukosta on huomattavissa etenkin sähkölämmitettyjen rakennusten voimakas lisääntyminen viimevuosikymmeninä, kun taas öljylämmitettyjen rakennusten määrä on lukumääräisesti pysynyt lähes samana 70-luvulta lähtien. Uusiin rakentamismääräyksiin sisältyvän primäärienergiakertoimen avulla pyritään muun muassa pysäyttämään sähkölämmitysrakennusten määrän lisääntyminen tulevaisuudessa. Taulukossa 2.3 puolestaan on kuvattu suomalaiset opetusrakennukset lämmitysaineen mukaan vuonna 2010.

Taulukko 2.3. *Suomalaiset opetusrakennukset energianlähteen mukaan vuonna 2010 (SVT, 2010d).*

Energianläde	Rakennuksia, kpl	Kerrosala, 1000 m ²	%, lukumäärästä	%, kerrosalasta
Kauko- tai aluelämpö	3441	12815	38,6	72,8
Öljy, kaasu	3278	3749	36,8	21,3
Sähkö	1058	434	11,9	2,5
Kivihiili	13	20	0,1	0,1
Puu, turve	779	433	8,7	2,5
Maalämpö	14	17	0,2	0,1
Muu, tuntematon	320	133	3,6	0,8
<i>Yhteensä</i>	<i>8903</i>	<i>17601</i>	<i>100</i>	<i>100</i>

Taulukosta nähdään, että opetusrakennuksista, verrattuna rakennuksiin keskimäärin, huomattavasti suurempi osa on jo kaukolämmön piirissä. Kuten edellä todettiin, myös koulujen osalta etenkin suuret yksiköt käyttävät primäärienergiatarkastelun kannalta edullista kaukolämpöä. Sähkö- sekä etenkin öljylämmitteisiä kouluja on kuitenkin lukumääräisesti vielä suhteellisen paljon ja toisaalta maalämpöä käyttäviä kouluja vähän.

2.3.5 Valaistus

Rakentamismääräyskokoelman D5 mukaan valaistuksen laskennallinen ominaissähkönkulutus opetusrakennuksissa on 23 kWh/brm²/vuosi, kun esimerkiksi ilmanvaihdon osuus on 12 kWh/brm²/vuosi ja laitteiden sähkönkulutus yhteensä 60 kWh/brm²/vuosi. Valaistuksen osuus koulujen sähkönkulutuksesta on selvästi suurempi kuin asuinrakennuksissa, joissa se on luokkaa 1/7 koko sähköenergiankulutuksesta. Valaistuksen tehostamiseen kohdistuvat toimenpiteet ovatkin kouluissa hyvä energiansäästöinvestointi. (D5, RakMK)

Korjausrakentamisessa mahdollisuudet vaikuttaa valaistuksen energiankulutukseen ovat vähäisemmät kuin uudisrakentamisessa, koska rakennuksen runkoon (ikkunat, huoneiden muoto) ei yleensä tehdä muutoksia. Tämän vuoksi energiansäästömahdollisuudet painottuvat pääasiassa valaistuslähteen valintaan, valaistustapaan sekä valaistuksen ohjaukseen.

Valaistuslähteen valinta vaikuttaa siihen, paljonko valaisin tuottaa valoa suhteessa kuluttamaansa energiaan. Kouluissa on yleensä käytössä jo loisteputkivalaistus, joten suuria säästöjä ei valaistuslähteen valinnalla ole enää saatavissa. Toisaalta siirtyminen magneettisella liitäntälaitteella toimivasta vanhasta T8-loistelampusta elektronisella liitäntälaitteella toimivaan energiatehokkaampaan T5-loistelamppuun on suhteellisen pieni operaatio, joten sekin on monesti kannattava toimenpide. Taulukossa 2.4 on esitetty eri lamputyyppien valotehokkuuksia.

Taulukko 2.4. Eri lampputyypin valotehokkuuksia (Holopainen et al., 2007).

Lampputyyppi	Valotehokkuus, lm/W
Hehkulamppu	10
Halogeenilamppu	12
Pienloistelamppu (kierrekantainen)	50
Loistelamppu, magneettinen liitäntälaite	75
Loistelamppu, elektroninen liitäntälaite	80
T5-loistelamppu, elektroninen liitäntälaite	85

Epäsuoraa valaistusta saattaa koulurakennuksissa olla esimerkiksi aulatiloissa ja käytävissä. Luokkatiloissa on yleensä kuitenkin käytössä suora valaistus, joka on myös energiatehokkain tapa valaista, joten säästömahdollisuudet valaistustapaa muuttamalla eivät kouluissa yleensä ole suuret. Valaistuksen ohjauksessa sitä vastoin mahdollisuuksia on monia. Kouluissa yleisesti käytössä oleva ohjaustapa on seinäkytkimillä tapahtuva päälle/pois-käsiohjaus, jonka vuoksi valot, kuten esimerkiksi taulun kohdevalo, saatavat helposti jäädä oppitunnin jälkeen päälle. Seinäkytkimen sijaan käytössä voisi olla läsnäolo-ohjaus, joka sammuttaa valot automaattisesti määrätyn viiveajan jälkeen viimeisestä läsnäolohavainnosta. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää poissaolo-ohjausta, joka muistuttaa enemmän perinteistä seinäkytkimestä kytkettävää päälle/pois-valaistusta, sillä luokkaan saavuttaessa valot on erikseen kytkettävä päälle, mutta pois valot kytkeytyvät automaattisesti viiveajan jälkeen viimeisestä läsnäolohavainnosta. Yksi energiaa säästävä ohjaustapa voisi olla vakiovalo-ohjaus, joka valoanturin avulla mukauttaa valaistusvoimakkuutta sisään tulevan päivänvalon mukaan. (Holopainen, et al., 2007)

2.4 Energiatehokkuus

2.4.1 Energiatodistus

Energiatodistuksen on tarkoitus helpottaa kuluttajan valintoja liittyen rakennuksiin. Se toimii kuten kodinkoneiden energiamerkki. Laki energiatodistuksesta tuli voimaan 1.1. 2008. Laki velvoittaa kaikki lain voimaantulon jälkeen rakennetut uudisrakennukset hankkimaan energiatodistuksen. 1.1.2009 voimaan tulleen asetuksen myötä lakia on voitu soveltaa myös ennen lain voimaantuloa valmistuneisiin rakennuksiin. (Energiatodistus, 2011a)

Energiatodistuksen avulla voidaan vertailla rakennusten energiatehokkuutta. Todistuksessa ilmoitetaan rakennuksen käyttötarkoituksessaan käyttämä vuotuinen energiamäärä. Vertailun helpottamiseksi energiamäärä jaetaan rakennuksen lämpimien tilojen bruttoalalla, jolloin saadaan eri rakennusten välillä vertailukelpoinen luku. Vertailua on helpotettu edelleen luomalla energiatehokkuusasteikko A-G, jolloin saman

rakennustyyppin kulutuksia on helppo verrata keskenään. Energiatehokkuusasteikot on jaettu seuraaviin rakennustyyppeihin:

- Pienet asuinrakennukset
- Suuret asuinrakennukset
- Toimistorakennukset
- Liikerakennukset
- Opetusrakennukset
- Päiväkodit
- Terveystoimintarakennukset
- Kokoonntumistilat
- Uimahallit
- Muut rakennukset

Uudisrakennuksissa energiatodistuksen antaa rakennuksen pääsuunnittelija. Todistus syntyy kuitenkin yhteistyössä rakennuksen muiden suunnittelijoiden kanssa. Pääsuunnittelija vastaa myös todistuksen varmentamisesta käyttöönottotarkastuksen yhteydessä. Energiatodistuksen olemassa oleville rakennuksille voi antaa erillinen, pätevyyskoulutuksen käynyt, energiatodistuksen antaja, energiakatselmoija tai taloyhtiön isännöitsijä/hallituksen puheenjohtaja. (*Energiatodistus, 2011b*)

2.4.2 Energiatehokkuusluvun määrittäminen

Energiatehokkuusluku määritetään jakamalla rakennuksen tarvitsema vuotuinen energiamäärä rakennuksen lämpimällä bruttoalalla. Rakennuksen tarvitsema vuotuinen energia puolestaan on lämmitysenergian, kiinteistösähköenergian ja mahdollisen jäähdytysenergian summa. (*Energiatodistusopas, 2009*)

Lämmitysenergia kuvaa rakennuksen lämmitykseen kuluva energiaa. Se sisältää rakennuksen lämpimän käyttöveden lämmitysenergian. Se ei sisällä energiantuotannon häviöitä, eli se ei kuvaa välttämättä suoraan ostoenergiaa. Lämmitysenergia voidaan kuitenkin olemassa olevissa rakennuksissa mitata ostoenergiasta (esimerkiksi kaukolämpö), kunhan muistetaan kertoa tulos laskentaohjeen mukaisella lämmöntuottolaitteiden laskennallisella vuosihyötysuhteella (kaukolämmöllä 1). Uudisrakennusten lämmityksen energiankulutus lasketaan rakentamismääräyskokoelman osan D5 ohjeiden mukaisesti. (*Energiatodistusopas, 2009*)

Lämmitysenergioista tehdään valtakunnallisesti vertailukelpoisia muuntamalla ne vastaamaan Jyväskylän normaalivuoden mukaista lämmitystarvelukua, $S_{n,vpkunta}$. Vuoden 2011 aikana on tulossa uusi normaalivuoden mukainen lämmitystarveluku, joka perustuu vuosiin 1981-2010, mutta toistaiseksi käytetään lämmitystarvelukua, joka perustuu vuoden 1971-2000 säätietoihin. Normitetun lämmitysenergian tarve, $Q_{lämm,norm}$, lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$Q_{\text{lämm,norm}} = k_2 \frac{S_{n,\text{vpkunta}}}{S_{\text{toteutunut,vpkunta}}} (Q_{\text{lämm}} - Q_{\text{lkv}}) + Q_{\text{lkv}} \quad (2.2)$$

missä k_2 on paikkakuntaan kohtainen korjauskerroin Jyväskylään, $S_{\text{toteutunut,vpkunta}}$ vertailupaikkakunnan lämmitystarveluku, $Q_{\text{lämm}}$ rakennuksen lämmitysenergia ja Q_{lkv} lämpimän käyttöveden lämmitysenergia. Korjauskerroin k_2 ja $S_{n,\text{vpkunta}}$ on saatavissa taulukoituna esimerkiksi Motivan internetsivuilta. Uudisrakennusten tapauksessa vertailukelpoisuus saadaan aikaan laskemalla lämmitystarve rakentamismääräysten osan D5 liitteen 1 säävyöhykke III (Jyväskylä Luonetjärvi) säätiedoilla. (*Energiatodistusopas, 2009; D5, RakMK*)

Kiinteistösähkö, $W_{\text{kiinteistösähkö}}$, koostuu pienissä asuinrakennuksissa kaikesta laitesähköstä. Se lasketaan uudisrakennuksissa rakentamismääräyskokoelman osan D5 mukaan – olemassa olevissa rakennuksissa se voidaan mitata. Suurissa asuinrakennuksissa ja muissa rakennuksissa laitesähkö sisältää talotekniikkaan liittyvän, kiinteistösaunojen, hissien, yleisten tilojen valaistuksen, ulkovalaistuksen ja kohdelämmityksen (kuten esimerkiksi autopaikat) sähkönkulutuksen. Muissa kuin asuinrakennuksissa kiinteistösähkö sisältää niin sanotun kiinteän valaistuksen. Se tarkoittaa valaistusta, jolla saavutetaan sisätilojen valaistusvaatimukset. Se ei sisällä esimerkiksi kohdevalaistusta. Kiinteistösähkö suurissa asuinrakennuksissa ei siis sisällä asuntojen sähkönkäyttöä eikä lämmitykseen liittyvää sähkönkäyttöä. Muissa rakennuksissa se ei sisällä lämmityssähkön ja kohdevalaistusten lisäksi käyttäjien pistorasiakulutusta esimerkiksi tietokoneille. Kiinteistösähkö ei sisällä jäähdytys sähköä, vaan se otetaan erikseen huomioon jäähdytysenergian, $Q_{\text{jäähdytys,tilat}}$, muodossa, mikäli rakennuksessa on koneellinen kompressorilla toimiva jäähdytys. (*Energiatodistusopas, 2009*)

Kun lämmitysenergia, kiinteistösähkö ja jäähdytysenergia tiedetään, voidaan energiatehokkuusluku, ET , laskea kaavalla

$$ET = \frac{\sum [Q_{\text{lämm,norm}} + W_{\text{kiinteistösähkö}} + Q_{\text{jäähdytys,tilat}}]}{\sum A_{\text{brutto}}} \quad (2.3)$$

jossa A_{brutto} on rakennuksen lämpimien tilojen bruttoala. (*Energiatodistusopas, 2009*)

2.4.3 Energiatehokkuusluokat

Kuten edellä mainittiin, on rakennukset jaettu rakennustyypeittäin eri energiatehokkuusluokkiin, A-G. Luokat on määritetty energiatehokkuusmääräyksiin ja rakennuskannan keskiarvoon liittyvien vertailuarvojen avulla. Luokkien jakoa on standardissa rakennusten energiatehokkuudesta opastettu seuraavasti:

- A:n kulutus on noin puolet energiatehokkuusmääräystasosta
- B energiatehokkuusmääräystasoa
- C määräystason ja keskimääräisen rakennuskannan välistä keskiarvoa
- D rakennuskannan keskiarvoa

- E 1,25 kertaa rakennuskannan keskiarvoa
- F 1,5 kertaa rakennuskannan keskiarvoa ja
- G yli 1,5 kertaa rakennuskannan keskiarvoa

(SFS-EN 15217). Parhaiden energialuokkien osalta alarajaa on kuitenkin määräyksissä nostettu. Taulukossa 2.5 on esitetty eri energiatehokkuusluokkien rajat rakennustyypeittäin, kuten ne Ympäristöministeriön asetuksessa energiatodistuksessa on annettu.

Taulukko 2.5. Rakennusten energiatehokkuusluokat ja raja-arvot rakennustyypeittäin.. (YM asetus rakennuksen energiatodistuksesta, 2007)

Rakennustyyppi	Energiatehokkuusluokka energiatehokkuuslukuineen (kWh/brm ² /vuosi)						
	A	B	C	D	E	F	G
Pienet asuinrakennukset	-150	151-170	171-190	191-230	231-270	271-320	321-
Suuret asuinrakennukset	-100	101-120	121-140	141-180	181-230	231-280	281-
Toimistot	-90	91-110	111-130	131-170	171-230	231-320	321-
Liikerakennukset	-140	141-180	181-220	221-280	281-360	361-440	440-
Opetusrakennukset	-120	121-150	151-190	191-230	231-300	301-400	401-
Päiväkodit	-140	141-180	181-230	231-300	301-390	391-500	501-
Terveystoimintarakennukset	-160	161-200	201-260	261-340	341-450	451-600	601-
Kokoontumislaitokset	-110	111-140	141-180	181-240	241-330	331-450	451-
Uimahallit	-300	301-410	411-530	531-670	671-860	861-1200	1201-
Muut rakennukset	-110	111-150	151-200	201-280	281-420	421-660	661-

Taulukossa on lihavoituna raja-arvot opetusrakennusten osalta. Voidaan nähdä, että opetusrakennusten energialuokitus on samankaltainen kuin toimisto- ja liikerakennuksilla. Asuinrakennuksissa luokkien erot ovat suppeammat.

2.5 Esimerkkiprojekteja

Koulujen energiatehokkuuden parantamiseksi on olemassa myös kansainvälisiä hankkeita. Hankkeista esitellään tässä kaksi: Annex 36 – Retrofitting of Educational Buildings (REDUCE) ja BRITA in PuBs (Bringing Retrofit Innovation to Application in Public Buildings).

Annex 36 on yksi kansainvälisen energiajärjestö IEA:n (The International Energy Agency) projekteista. IEA on 28 jäsenvaltion järjestö ja se perustettiin öljykriisin seurauksena vuonna 1973. Järjestön päätehtävinä nykyään pidetään energiaturvallisuudesta sekä taloudellisen kehityksen edellytyksistä huolehtimisesta järjestön jäsenvaltioissa. Lisäksi järjestössä korostetaan ympäristötietoutta sekä yhteistyötä ei-jäsenvaltioiden kanssa parempien energia- ja ympäristöratkaisujen löytämiseksi. (IEA, 2011) Annex 36 –projekti toteutettiin pääasiassa vuosina 1999-2003. Kuten nimestäkin käy ilmi oli projektin aiheena koulurakennusten parantaminen energiatehokkuusremonttien avulla. Projektissa käytettiin ennen projektin alkua valmistuneita korjauskohteita

kymmenestä IEA:han kuuluvasta maasta. Tutkittuja kohteita oli yhteensä 25 kappaletta. Projektia jatkettiin myöhemmin vielä kahdeksalla lisäkohteella. Projektin tavoitteena oli tarjota ohjeita ja työkaluja päätöksentekijöille liittyen koulujen energiatehokkuuden parantamiseen. Lisäksi projektin yksi päämäärä oli edistää energia- ja kustannustehokkaita korjausmenetelmiä, kuten painovoimaisen ja koneellisen ilmanvaihdon yhdistävää hybridi-ilmanvaihtoa. Projektin osatavoitteena olleiden työkalujen osalta projektin tulokset eivät olleet kovin hyödyllisiä, eikä kaikkia niistä edes saatettu loppuun. Eri maissa toteutetut energiansäästökorjausten raportit olivat kuitenkin valaisevia. (*Annex 36, 2004*)

BRITA in PuBs on Euroopan unionin projekti energiatehokkaiden korjausmenetelmien edistämiseksi julkisissa rakennuksissa. Projektin tavoitteet olivat hyvin samankaltaiset kuin Annex 36:nkin. Projekti tarjoaa kahdeksan lisäkohdetta Annex 36 esitettyjen energiatehokkuuden parannuskohteiden lisäksi. Lisäksi projektissa viimeisteltiin yksi Annex 36 –projektissa kesken jäänyt energiatehokkuuden arviointityökalu. Työkalun avulla voidaan verrata rakennuksen lämmön-, sähkön- ja vedenkulutusta kunkin projektiin osallistuneen maan keskiarvoihin. Työkalu tosin toimii ainoastaan muutaman maan osalta täydellisesti. (*BRITA in PuBs, 2008*)

Projektien parasta antia onkin eri maissa toteutettujen energiansäästöremonttien raportit. Raporttien tekninen puoli on melko kevyt, joten on vaikea saada tarkkaa kuvaa käyttöön otetuista järjestelmistä, mutta raportit toimivat hyvin esimerkkeinä mahdollisuuksien vaihtoehtoista energiatehokkaassa korjausrakentamisessa. Seuraavassa on esitelty muutama projekteissa mukana ollut koulu.

2.5.1 Oulunjoen ala-asteen ilmanvaihdon perusparannus

Kohteena oli 1940-luvulla rakennettu Oulunjoen koulu, jossa ilmanvaihto oli alun perin toteutettu painovoimaisesti, kuten vastaavan ikäluokan kouluissa yleensä. Myöhemmin keittiöön oli asennettu oma koneellinen tulo ja poistoilmanvaihto. Perusparannuksen toteutusvuosi oli 1997. Perusparannuksen yhtenä motiivina oli kasvaneiden oppilasmäärien takia riittämättömäksi käynyt ilmanvaihto.

Koulu on lattiapinta-alaltaan 2522 m²:n (korjattu ala 1026 m²) ja sisätilavuudeltaan 9340 m³:n kokoinen, 180 oppilaan koulu. Vuotuinen lämmönkulutus ennen parannusta oli keskimäärin 56,6 kWh/rm³a ja sähkönkulutus 6,8 kWh/rm³a. Veden kulutus oli keskimäärin 713 dm³/rm³a. Luokkien hiilidioksidipitoisuudet oppituntien päätteeksi olivat keskimäärin 1600 ppm.

Uudeksi ilmanvaihtojärjestelmäksi valittiin keskitetty tulo- ja poistoilmanvaihtokone pyörivällä lämmön talteenotolla. Ilmavirrat mitoitettiin vuonna 1997 voimassa olleen rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaisesti luokkatiloissa arvoon 3 dm³/m²s, käytävätiloissa arvoon 1 dm³/m²s ja juhlasalissa tehostuksesta riippuen arvoon 2-6 dm³/m²s.

Projektin kustannuksiksi muodostui vuonna 1997 1220 mk/m² (korjauksen kohteena olevaa alaa kohti). Tämä voidaan muuttaa esimerkiksi tilastokeskuksen rahanar-

vokertoimen avulla, inflaatio ja euroon siirtyminen huomioiden, nykyeuroiksi, jolloin kustannuksiksi saadaan 250 €/m² (SVT, 2010b).

Lämmönkulutus koulussa pieneni tarkastelujaksolla 1.9.-28.2. noin 21,6 MWh:lla ennen perusparannusta mitatusta 350 MWh:sta perusparannuksen jälkeisen ajanjakson 330 MWh:iin. Ennen perusparannusta kyseisellä aikajaksolla kulunut 350 MWh vastaa keskimäärin noin 62 % vuosien 1996 ja 1997 keskimääräisestä kulutuksesta. Tästä voidaan karkeasti arvioida, että kyseinen 21,6 MWh:n säästö lämmönkulutuksessa kyseisellä ajanjaksolla merkitsee suunnilleen 35 MWh:n säästöä vuositasolla. Sähkön kulutus puolestaan oli samalla tarkastelujaksolla kasvanut 7,9 MWh:lla ennen perusparannusta mitatusta 40,0 MWh:sta perusparannuksen jälkeiseen 47,9 MWh:iin. Kyseisen ajanjakson sähkönkulutus ennen perusparannusta vastaa noin 58 % vuosien 1996 ja 1997 sähkönkulutuksien keskiarvosta. Tästä voidaan arvioida sähkön vuosikulutuksen kasvaneen vuositasolla arviolta noin 14 MWh:lla.

Mikäli oletetaan kaukolämmön hinnaksi Oulussa 50 €/MWh (*Kaukolämmön hinnat, 2011*) ja sähkön hinnaksi ja noin 12 snt/kWh, voidaan arvioida vastaavan investoinnin kannattavuutta nykypäivänä: Vuositasolla sähkölasku kallistuisi 1680 eurolla ja kaukolämpölasku halpenisi 1750 eurolla – säästöä koituisi 70 euroa vuodessa. Voidaan todeta, että energiansäästön näkökulmasta perusparannus ei nykypäivänä olisi kannattava. (Säkinen, 1998; BRITA in PuBs, 2008; Annex 36, 2004)

2.5.2 Wausau West High Schoolin perusparannus

Wausau West High School sijaitsee Wausaun kaupungissa keskellä Wisconsinin osavaltiota Yhdysvalloissa. Koulu on rakennettu 1968 ja on lattia-alaltaan 25 548 m² suuri 1850 oppilaan koulu.

Vanha ilmanvaihtojärjestelmä oli mitoitettu siten, että ulkoilmavirta oppilasta kohti oli noin 2,4 dm³/s/hlö. Hiilidioksidipitoisuudet koulussa olivat yli 1000 ppm. Perusparannuksen aikaisten määräysten mukainen ilmavirta oppilasta kohti oli 7 dm³/s/hlö. Perusparannuksen jälkeen hiilidioksidipitoisuudet vaihtelivat 400-850 ppm:n välillä.

Uusi ilmanvaihtojärjestelmä oli niin sanottu hybridijärjestelmä, jonka toiminta perustui sekä luonnolliseen ilmanvaihtoon että pakotettuun, puhaltimilla toteutettuun, ilmanvaihtoon. Keskitetyn järjestelmän käyttöönotto vähensi erillisten ilmanvaihtokoneiden tarvetta koulussa seitsemällä kappaleella. Järjestelmä suunniteltiin käyttämään regeneratiivista lämmön talteenottoa, joka puolestaan vähensi merkittävästi lämmityksen tarvetta. Lämmön talteenotto on myös mahdollista ohittaa tarvittaessa, jolloin tiloihin voitiin tuottaa suoraan ulkoilmaa. Tämä toi huomattavia säästöjä jäähdytystarpeeseen. Jäähdytyslaitteiston energianenergian kulutus pieneni entisestä 2250 kW:sta yhteensä noin 350 kW laitteistoihin.

Muita muutoksia koululla olivat lämmitysjärjestelmän muuttaminen höyrykattiloista (kokonaisteho 7900 kW) vesikattiloiksi (kokonaisteho 4100 kW) sekä polttoaineen muuttaminen propaanista maakaasuksi. Myös valaistusta modernisoitiin. Ilmas-

toinnin ohjaus yhdistettiin valaistukseen, jonka seurauksena tyhjien tilojen turha ilmanvaihto loppui, mikäli lämpötila pysyi halutulla alueella.

Koulun lämmönkulutus laski parannuksen lopputuloksena noin 1500 MWh ja sähkönkulutus ilmastoinnissa sekä jäähdytyksessä 385 MWh. Valaistuksen sähkönkulutus laski 945 MWh. Valaistuksen uusiminen maksoi 193 000 euroa ja lämmitysjärjestelmän, ilmanvaihdon sekä jäähdytyksen uusiminen 4,24 miljoonaa euroa. Takaisinmaksuajaksi projektille laskettiin 10-15 vuotta. (*Annex 36, 2004*)

2.5.3 Egebjergin, Enghøjskolen ja Vridsløselillen koulujen perusparannukset Tanskassa

Egebjergin koulu on vuosina 1973-81 rakennettu 17 825 m²:n ja noin tuhannen oppilaan koulu, jossa perusparannus osa on kooltaan 1714 m² (12 luokkahuonetta). Enghøjskole on noin vuonna 1974 valmistunut 10 000 m²:n ja 500 oppilaan koulu. Vridsløselille on vuonna 1968 valmistunut 1740 m²:n ja 200 oppilaan koulu. Koulujen perusparannuksen ideana oli muutos koneellisesta ilmanvaihdosta painovoimaiseen ilmanvaihtoon.

Egebjergin koulussa aikaisempaan järjestelmänä toimivat konvektori-tyyppiset patterit, joiden läpi johdettiin palautusilmaa rakennuksen alla olevasta ryömintätilasta, johon poistoilma puhallettiin. Enghøjskolen koulun patteriverkosto oli kytketty suoraan kaukolämpöpiiriin ilman lämmönvaihdinta ja sekundääripiiriä. Koneellista ilmanvaihtoa käytettiin apulämmitykseen kun lämpötila laski pakkaselle. Vridsløselillen koulussa lämmitys hoidettiin puoliksi koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon avulla ja puoliksi radiaattori-tyyppisten pattereiden avulla. Ilmanvaihdossa käytettiin jonkun myös verran palautusilmaa. Kaikkien koulujen vanhoille järjestelmille yhteistä oli huono ylläpito ja osittainen toimimattomuus.

Uutena järjestelmänä Egebjergin koulussa käytettiin painovoimaista ilmanvaihtoa, jota voidaan tehostaa tuulen ja auringon avulla. Kesällä painovoimaiseen hormiin voidaan johtaa auringon avulla lämmitettyä ilmaa vedon tehostamiseksi. Korvausilma otetaan rakennuksen alla sijaitsevasta ryömintätilasta. Ryömintätilaan ilma voidaan johtaa joko maanalaisen kanavan kautta kesällä, jolloin ilma tulee tiloihin viileämpänä tai niin sanotun kanadalaisen aurinkoseinän kautta lämmityskaudella, jolloin auringon säteily esilämmittää ilman. Ilmanvaihtuvuutta voidaan myös ohjata hiilidioksidipitoisuuden mukaan. Egebjergin koulussa uusittiin myös konvektorit sekä parannettiin vaipan lämmöneristystä. Enghøjskolella ilmanvaihto uusittiin henkilökunnan, oppilaiden, heidän vanhempiensa, konsulttien ja ylläpitohenkilökunnan yhteisestä päätöksestä ikkunatuuletuksesi. Rakennuksen vaipan lämmöneristystä parannettiin vastaamaan nykyisiä tanskalaisia rakentamismääräyksiä ja lisäksi luokkien ilmatilavuutta kasvatettiin korottamalla tasaiset alakatot harjakaton suuntaiseksi. Lisäksi luokkakokoja pienennettiin, joka paransi ilmanlaatua luokissa. Vridsløselillen koulussa lämmöneristystä parannettiin ainoastaan yläpohjan osalta lisäämällä 100 mm lämmöneristettä. Vanha ilmanvaihtoratkaisu vaihdettiin painovoimaiseen ilmanvaihtoon, jossa korvausilma otetaan luokkatiloihin patterin takana olevasta korvausilmaventtiilistä. Venttiileihin asennettiin hiilidi-

oksidiohjaus, joka ohjaa korvausilmaventtiilin painehäviötä CO₂-pitoisuuden ja lämpötilan mukaan. Myös patterit uusittiin ilmanvaihtoratkaisuun sopiviksi.

Perusparannusprojekti Egebjergissä maksoi energiansäästötoimenpiteiden osalta noin 510 000 euroa (297,5 €/m²). Perusparannuksen tuloksena lämmitysenergian kulutus väheni noin 80 kWh/m² ennen remonttia kuluneesta 180 kWh/m²:sta. Sähkönkulutuksen osalta säästön arvioitiin olevan noin 14-18 kWh/m² – sitä ei kuitenkaan mitattu. Ilmanlaadun arvioitiin parantuneen myös huomattavasti. Enghøjskolen tapauksessa lämmitysenergiesäästö oli huomattava. Uuden lämmitysenergian kulutuksen arvioitiin olevan kolmasosa ennen perusparannusta vallinneesta kulutuksesta. Perusparannuksen kokonaiskustannukseksi tuli 965 €/m². Takaisinmaksuaikaa ei laskettu. Ilmanlaatu ei sanottavasti parantunut, mutta projektin kantavana ajatuksena oli, että opetushenkilökunnan ja oppilaiden mahdollisuus vaikuttaa luokkien ilmanvaihtoon ikkunatuuletuksen avulla vähentää negatiivista palautetta ilmanlaadusta. Vridsløselillen koulun perusparannus maksoi 1 671 000 euroa (960 €/m²). Luonnollisen ilmanvaihdon vaatimien muutostöiden osuus summasta oli 221 500 euroa. Lämmitysenergian ja sähkön säästöksi projektissa arvioitiin 25 kWh/m² ja 6 kWh/m². Ilmanlaadun koettiin parantuneen projektin aikana. Ilmanvaihtuvuus luokissa remontin jälkeen oli 0,7 l/h kun tuloilmaventtiili oli kuristettuna ja 1,5 dm³/h kun venttiili oli auki. Maksimihiilidioksidipitoisuus luokissa vaihteli 1100-1600 ppm:n välillä. (*Annex 36, 2004*)

3 TUTKITTAVIEN KOULUJEN LÄHTÖTILANNE

3.1 Case-tapaukset

3.1.1 Koulu A

Koulu A on vuonna 1952 valmistunut alakoulu. Koulurakennus koostuu kellarista, jossa on muun muassa koulun ruokala ja käsityötilat, kahdesta opetuskerroksesta ja kylmästä ullakkokerroksesta. Koulun bruttoala on 1072 m² ja lämpimien tilojen tilavuus 3769 m³. Rakennuksen seinät koostuvat kolminkertaisesta sementtitiiliseinästä, jonka välissä on kaksi ilmarakoa. Toinen seinien ilmarakoa on täytetty koksikuonalla. Rakennuksen pituussuunnassa kulkee kantava kaksinkertaiseksi muurattu väliseinä, muut kevyemmät väliseinät on muurattu juoksutiilestä. Välipohjat ja yläpohja ovat betonipohjalle vasojen varaan rakennettuja laotalattioita, joiden päälle on myöhemmin asennettu muovimatot. Eristeenä välipohjissa on käytetty työselityksen mukaan joko sammalta tai turvepehkuu, joka on peitetty kuivalla savella. Rakennuksen ikkunat ovat alkuperäisiä kaksilasisia ikkunoita. Ilmanvaihto on alun perin ollut painovoimainen, mutta sitä on aikojen saatossa uusittu. Viimeisen kymmenen vuoden aikana on kouluun asennettu 6 tilakohtaista tulo- ja poistoilmakonetta. Rakennuksessa on myös kolme huippuimuria. Lämmönjako on koulussa toteutettu vesikiertoisella patterilämmityksellä. Lämmitysmuotona on öljylämmitys. Koulussa on noin 50 oppilasta ja henkilökuntaa 5-10 henkeä.



Kuva 3.1. Koulu A.

Koulu A valittiin projektiin esimerkkinä niin sanotusta hyvästä koulusta pienen energiankulutuksen vuoksi. Koulussa ei juurikaan käytetä ikkunatuuletusta ja ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhde on hiljattain uusitun ilmanvaihdon ansiosta hyvä (noin 50 %). Ilmanpitävyysmittauksissa koulun ilmanvuotoluvuksi, n_{50} , saatiin 1,8 l/h.

3.1.2 Koulu B

Koulu B on kolmikerroksinen vuosina 1969 ja 1972 rakennettu alakoulu. Rakennuksen länsipääty on rakennettu 1969 ja itäpääty lisäsiipineen 1972. Koulun bruttoala on 5925 m² ja tilavuus 22000 m³. Rakennuksen alapohja koostuu maavaraisesta betonilaatasta ja seinät ovat betonisandwich-rakenteisia elementtiseiniä. Rakennus on pohjoispäädystään noin kaksi metriä maan pinnan alapuolella. Yläpohja on toteutettu ontelolaattarakenteisena tasakattona. Vanha ja uusi osa ovat rakenteeltaan lähes samanlaisia lukuun ottamatta ikkunoita ja ilmanvaihtoa. Vanhan osan ikkunat ovat kaksilasisia MS-ikkunoita. Uuden osan ikkunat ovat MSE-ikkunoita. Sekä vanhan että uuden osan ikkunat on varustettu tuuletusluukuilla. Molempien puolien ikkunoiden ulkopuitteet ovat huonossa kunnossa. Vanhan osan ilmanvaihto on toteutettu poistoilmakoneilla ja huippuimureilla lukuun ottamatta yhtä, allergialuokkana toimivaa tilaa, jossa on oma tulo- ja poistoilmakone. Korvausilma vanhalla puolella otetaan tuuletusluukkujen avulla. Uuden puolen ilmanvaihto on toteutettu erillisillä tulo- ja poistoilmakoneilla. Lämmönjako on koulussa toteutettu vesikiertoisella patterilämmityksellä ja lämmitysmuotona on kaukolämpö. Koulun oppilasmäärä on noin 280. Henkilökunnan määrä koululla vaihtelee kahden- ja kolmenkymmenen välillä. Koululla ei ole tehty minkäänlaista rakenteellista peruskorjausta. Kaukolämpölaitteet on uusittu 2000-2001 ja ilmanvaihtoon on tehty rakennuksen valmistumisen jälkeen ainoastaan pieniä parannuksia kuten lisätty muutamia huippuimureita.



Kuva 3.2. Koulu B.

Koulu B valittiin projektiin sen suuren lämmönkulutuksen vuoksi. Projektin aikana on muun muassa selvinnyt, että huonon ilmanlaadun vuoksi tuuletusluukut ovat koululla auki käytännössä lähes vuoden ympäri. Huono ilmanlaatu rakennuksen vanhas-
sa osassa puolestaan johtui siitä, että luokkien huippuimuri oli huonon ohjeistuksen vuoksi ollut pois päältä jo vuosien ajan. Tästä syystä on ilmanvaihto rakennuksen van-
hassa osassa toiminut ainoastaan lähinnä painovoimaisesti. Lisäksi projektiin liittyvän
mittausjakson aikana keväällä oli liikuntasalin ilmanvaihto jätetty erehdyksessä päälle
noin kahdeksi kuukaudeksi. Projektiin liittyviä mittauksia ja niihin liittyviä johtopäätök-
siä käsitellään tarkemmin Eerik Mäkitalon diplomityössä.

3.2 Simulointimallit

Koulujen energiansäästöä tarkastellaan kouluista tehdyillä erilaisilla simulointimalleilla. Tarkoituksena on löytää mahdollisimman yksinkertainen simulointimalli, jonka avulla voidaan luotettavasti arvioida kouluissa erilaisten toimenpiteiden avulla aikaansaattavia energiansäästöjä. Simulointimalleja tehtiin aluksi kolme erilaista:

- Yksityiskohtainen simulointimalli
- Yksinkertainen simulointimalli
- Rakentamismääräyskokoelman mukainen malli

Mallit perustuvat eri lähtötietojen määrään. Yksityiskohtainen simulointimalli pyrittiin rakentamaan mahdollisimman tarkasti käytettävissä olevien lähtötietojen mukaiseksi. Yksinkertainen simulointimalli puolestaan rakennettiin yksityiskohtaisen mallin pohjal-
ta yksinkertaistaen mallin rakennetta siten, että rakennuksen ikkunat yhdistettiin ja ra-
kennuksien sisätilat yhdistettiin kerroksittain. Työn kuluessa mallista tehtiin myös toi-
nen versio, jota korjattiin kerrosten välisillä porraskäytäviä kuvaavilla vuotoilma-
aukoilla, kun huomattiin ero yksinkertaisen ja yksityiskohtaisen simulointimallin taseis-
sa. Rakentamismääräysten mukainen malli on vaipaltaan ja sisätiloiltaan kuten yksin-
kertainen simulointimallikin, mutta lähtötietojen sijaan käytetään rakentamismääräys-
kokoelman D3 (esitys 2012) standardikäytön mukaisia ihmis-, laite- ja valaistuskuormia
sekä käyttöveden määrää sekä D2:n mukaista ilmanvaihtoa.

Simulointimallit rakennettiin käyttäen simulointiohjelmaa IDA Indoor Climate and Energy 4 Expert edition. Ohjelmalla voidaan simuloida rakennusten energiatehok-
kuutta graafisen käyttöliittymän avulla. Ohjelman avulla voidaan simuloida rakennuksia
halutun aikajakson yli ja tarkastella muun muassa käytettyä lämmitysenergian ja sähkön
määrää kyseisellä ajan jaksolla. Säädatana simulointiohjelmassa käytettiin vuoden 1979
Jyväskylän säädataa. Lisäksi voidaan tarkastella ilmanvaihdon riittävyyttä esimerkiksi
hiilidioksidipitoisuuden avulla. Tekemällä simulointimalliin muutoksia saadaan arvio
siitä kuinka suuri säästö halutulla energiansäästötoimenpiteellä voidaan saada aikaan.

Simulointimalleja käytetään tässä työssä lämmitysenergian säästöjen kartoitta-
miseen, joten sähkön kulutukseen etenkin kesäaikana ei ole kiinnitetty valtavasti huo-

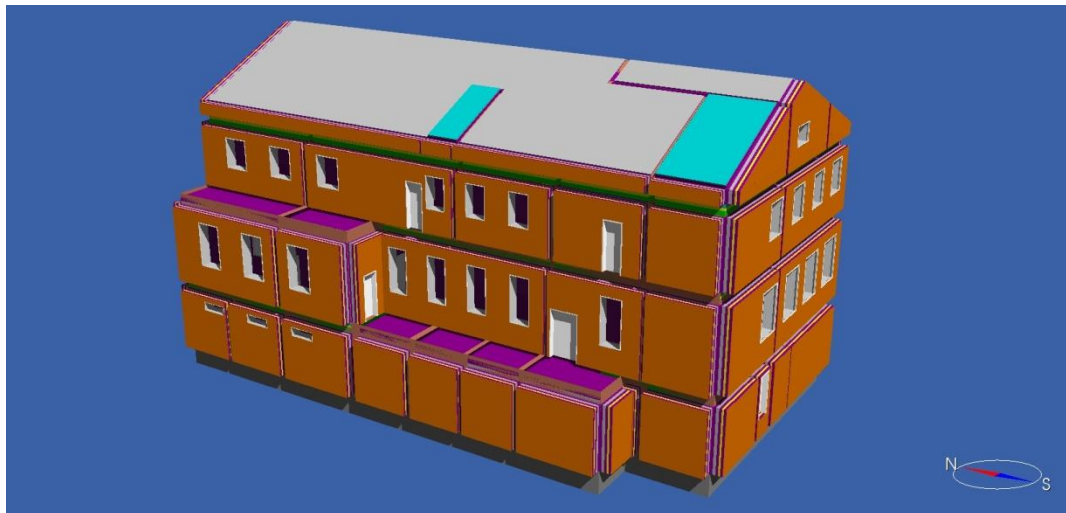
miota. Kappaleissa 3.3 ja 3.4 on käyty tarkemmin läpi koulujen simulointimalleihin liittyviä asioita.

3.3 Koulun A simulointimallit

3.3.1 Yksityiskohtainen simulointimalli

Yksityiskohtainen malli on tehty koulun pohjapiirustusten mukaan jokainen tila erikseen mallintaen lukuun ottamatta varastotiloja ja WC-tiloja, joita on yhdistetty keskenään tai viereisiin tiloihin. Yksityiskohtaisen simulointimallin huonekohtaisia tavoitelämpötiloja on mallinnettu jakamalla rakennus keskilämpötilojen perusteella neljään lämpötilatasoon. Koulun huonekohtaisia keskilämpötiloja on projektin aikana mitattu noin neljän kuukauden pituisella ajanjaksolla. lämpötilatasot on saatu laskemalla huone-tilavuudella painotettu keskiarvo kunkin lämpötilatason huoneista.

Seinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteet on mallinnettu rakennustapakuvauksessa kuvattujen rakenteiden kaltaisina ja Rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisilla aineiden tiheyksillä, ominaislämpökapasiteeteilla ja lämmönjohtavuuksilla. Ikkunat ovat kaksilasiset ja vuosien 1962-1975 rakentamismääräysten mukaiset ($U=3,1 \text{ W/m}^2\text{K}$). Ilmanvuotolukuna, n_{50} , on käytetty 2 l/h . Lämpimän käyttöveden kulutukseksi on arvioitu 40 % vuotuisesta käyttöveden kulutuksesta. Ilmanvaihto on mallinnettu kuudella erillisellä ilmanvaihtokoneella, joista jokaiselle on asetettu oma, mittausten perusteella laskettu lämmön talteenoton hyötysuhde. Ilmanvaihtomäärät on asetettu mahdollisimman tarkasti mittausten perusteella. Rakennuksen huippuimurit on mallinnettu yhdellä komponentilla.



Kuva 3.3. Koulun A simulointimalli.

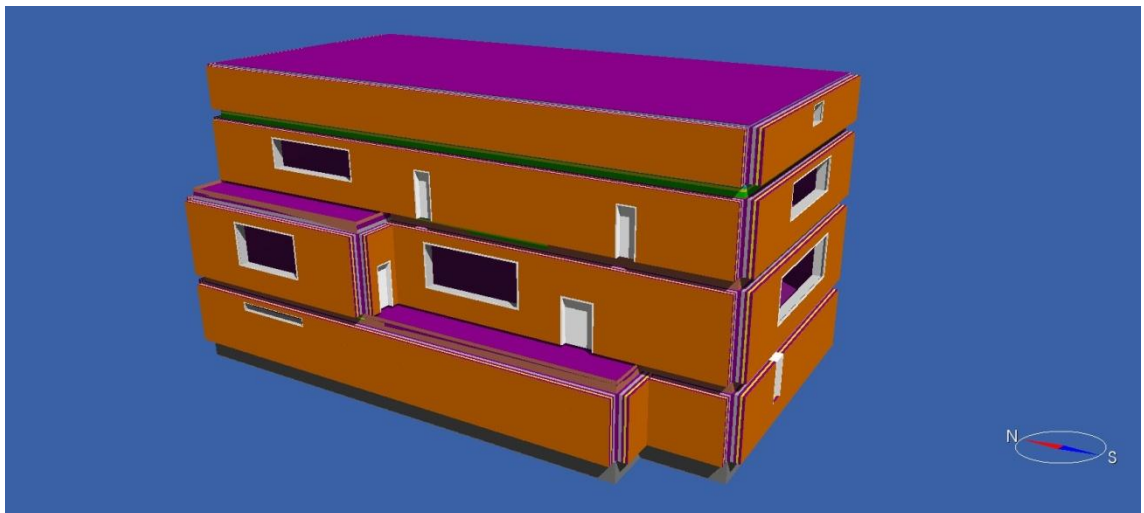
Rakennuksen sisäisistä laite-, valaistus- ja henkilökuormista on taulukko *liitteesä 1*. Kuormat on pyritty jakamaan mahdollisimman totuudenmukaisesti. Kuormien käyttöaikoja on erikseen ilmastoinnille, ruokalalle, ympäri vuoden päällä oleville sähkölaitteille ja normaalille käyttöajalle. Aulojen ja porraskäytävien valot ovat ilmastoinnin

kanssa samassa aikataulussa 7-17, muuten kaikki opetukseen liittyvät kuormat ovat päällä normaalin käyttöajan mukaan 8-16. Käyttöajat on tarkemmin kuvattu *liitteessä 3*.

3.3.2 Yksinkertainen simulointimalli

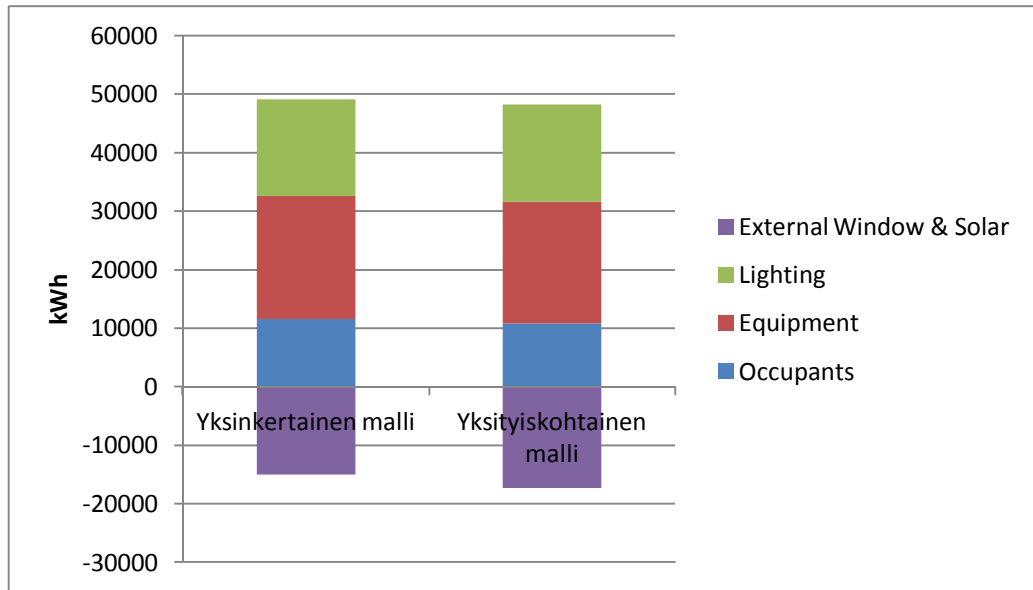
Kuten edellä todettiin, tehtiin yksinkertaisesta simulointimallista kaksi eri versiota. Mallien ero on porraskäytäviä kuvaavat $0,2 \text{ m}^2$ kokoiset vuotoilma-aukot kerrosten välillä. Syy toisen mallin tekemiselle on selitetty kappaleessa 3.6 Simulointimallien vertailua. Seuraavassa on kuvattu tarkemmin yksinkertaista simulointimallia.

Yksinkertaisessa simulointimallissa rakennuksen vaippa on täsmälleen sama kuin yksityiskohtaisessakin simulointimallissa lukuun ottamatta ikkunoita. Ikkunat on yksinkertaisessa mallissa mallinnettu joka seinällä kerroksittain yhtenä alana. Simulointiohjelman laskennan kannalta yksityiskohtaisen mallin väliseinät kuitenkin vähentävät vaipan alaa suhteessa yksinkertaiseen malliin, sillä ohjelma tarkastelee tiloja sisältä käsin. Kylmä ullakkotila on mallinnettu yksinkertaisessa mallissa tilavuudeltaan yksityiskohtaista mallia vastaavaksi laatikoksi. Rakennusta ei ole mallinnettu sisältä huonekohtaisilla vyöhykkeillä, vaan jokainen kerros on mallinnettu omana vyöhykkeenään kompensoimalla puuttuvat sisäseinät vyöhykkeen sisäisenä termisenä massana. Jokaiselle kerrokselle on myös laskettu simulointimalliin tavoitelämpötila ottamalla kerroksen jokaisen huoneen mitatusta keskilämpötilasta tilavuudella painotettu keskiarvo koko kerrokselle. Rakennuksen maanalainen osa on mallinnettu molemmissa malleissa samalla tavalla.



Kuva 3.4. Koulun A yksinkertainen simulointimalli.

Sisäisten kuormien lukumäärä on laskettu kerroksittain laskemalla ensin kunkin kerroksen kuorman vuotuinen energiankulutus kyseisellä käyttöaikataululla, laskemalla tämän jälkeen yhteen kaikki kerroksen kuormat ja jakamalla lopuksi energiankulutus yksinkertaisen mallin käyttöaikataululla. Näin saadaan mahdollisimman sama sähkönkulutus kuin yksityiskohtaisessa mallissa. Sisäisten kuormien suuruus on myös tarkistettu simulointitulosteista löytyvien taseiden avulla oikeiksi. Kuvaajassa 3.1 on esitetty yksityiskohtaisen ja yksinkertaistetun mallin sisäiset kuormat.



Kuvaaja 3.1. Yksinkertaisen ja yksityiskohtaisen simulointimallin sisäisten kuormien vuotuinen suuruus koulussa A.

Ikkunoiden tase sisältää aurinkoenergian lisäksi myös ikkunoiden kautta tapahtuvan lämpöhäviön ja tästä syystä vuotuinen tase on negatiivinen. Kuvaajasta nähdään, että ikkunoiden osalta malleissa on hiukan eroa, joka johtuu ikkunoiden karmien alan muutoksesta ikkunoita yhdistettäessä. Simulointiohjelmassa karmin alaksi lasketaan 10 % ikkuna-alasta, jolloin ikkunoiden yhdistäminen vääristää hieman aukon alaa. Vaikka ero ikkunoiden osalta on lähes 14 %, on se kuitenkin kokonaisuuden kannalta niin pieni, noin 2400 kWh/a, joka on ainoastaan noin 2 % tilojen lämmitysenergian tarpeesta, että sitä voidaan pitää tarkastelujen kannalta merkityksettömänä.

3.3.3 Rakentamismääräysten mukainen karkea malli

Kolmas simulointimalli on vaipaltaan yksinkertaistetun mallin kaltainen. Käyttöaikojen ja sisäisten kuormien osalta malli on kuitenkin rakentamismääräyskokoelman osan D3 standardikäytön mukainen. Valaistuskuorma on 18 W/m^2 , kuluttajalaitteet aiheuttavat 8 W/m^2 ja ihmiset 14 W/m^2 kuorman. Kuormat on laskettu lämmintä nettoalaa kohti. Ihmisten osalta on oletettu, että yhden ihmisen lämmönluovutus on 126 W, joka vastaa aineenvaihdunnan arvoa 1,2 met IDA-ohjelmistossa käytettävällä $1,8 \text{ m}^2$ pinta-alalla. (IDA, 2009; D3, RakMK)

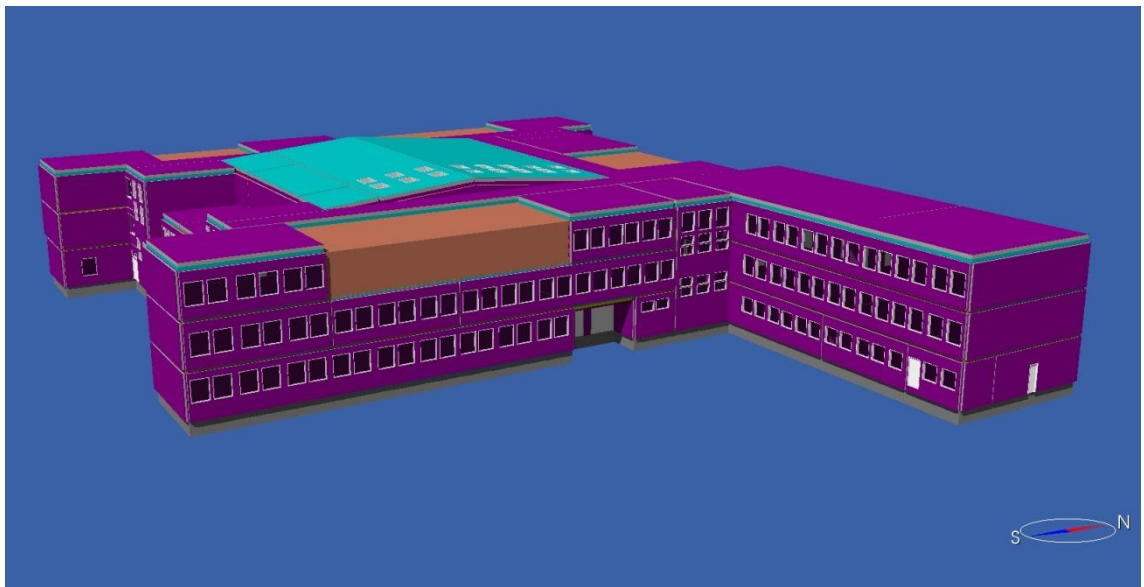
Lämpimän käyttöveden osalta mallissa käytetään todellisen vedenkulutuksen sijaan niin ikään rakentamismääräyskokoelman osassa D3 annettua arvoa $11 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$. Käyttöveden määrä lasketaan nettoalaa kohti. Mallin ilmanvaihdoksi asetetaan rakentamismääräyskokoelman D2 mukainen ilmanvaihto joka tilaan, jonka jälkeen lasketaan kerroskohtainen ilmanvaihto. Poistoilmavirraksi valitaan 5 % tuloilmavirtaa suurempi ilmavirta. Tilojen lämpötiloiksi valitaan 21°C . Malli voidaan siis rakentaa täysin ilman tarkempaa tietoa koulun kuormista ainoastaan rakenteellisten tietojen perusteella.

3.4 Koulun B simulointimallit

3.4.1 Yksityiskohtainen simulointimalli

Yksityiskohtainen simulointimalli on tehty pohjapiirustusten mukaan mallintaen luokat, käytävät, liikuntasali ja ruokala omina vyöhykkeinään ja yhdistellen muita tiloja kuten kouluterveydenhoitajan ja hammashoitajan tiloja, pommisuojaan tiloja ja varastotiloja keskenään suuremmiksi vyöhykkeiksi. Ikkunat ja ovet on mallinnettu mahdollisimman tarkasti pohjapiirustusten mukaan. Ilmanvaihto vanhalla puolella on mallinnettu yhden poistoilmapuhaltimen avulla ja korvausilman tuottamiseen käytettävät tuuletusluukut on simulointimallissa mallinnettu erillisinä vaipan ilmanvuotolukuun vaikuttamattomina vuotoreitteinä rakennuksen vanhan osan ulkoseinässä. Uuden puolen ilmanvaihto on mallinnettu erillisellä tulo- ja poistokoneella ilman lämmön talteenottoa. Vaipan ilmanvuotoluku, n_{50} , on huonojen ikkunatiivistysten vuoksi arvioitu erittäin heikoksi 5 1/h.

Seinä-, yläpohja- ja alapohjarakenteet on mallinnettu rakennustapakuvauksen pohjalta rakentamismääräyskokoelman osan C4 mukaisilla tiheyden, ominaislämpökapasiteetin ja lämmönjohtavuuden arvoilla. Vanhan puolen MS-ikkunoiden U-arvoksi on arvioitu vuoden 1972 rakentamismääräysten mukainen $3,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Uuden puolen MSE-ikkunoiden U-arvoksi on arvioitu hieman tavanomaisen MSE-ikkunan U-arvoa, $1,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, huonompi $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Vedenkulutuksesta ei ollut saatavilla kulutustietoja, joten sitä on arvioitu Rakentamismääräyskokoelman osan D3 mukaisesti $11 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{a}$, jossa kulutus on ilmoitettu nettoalaa kohti.



Kuva 3.5. Koulun B yksityiskohtainen simulointimalli.

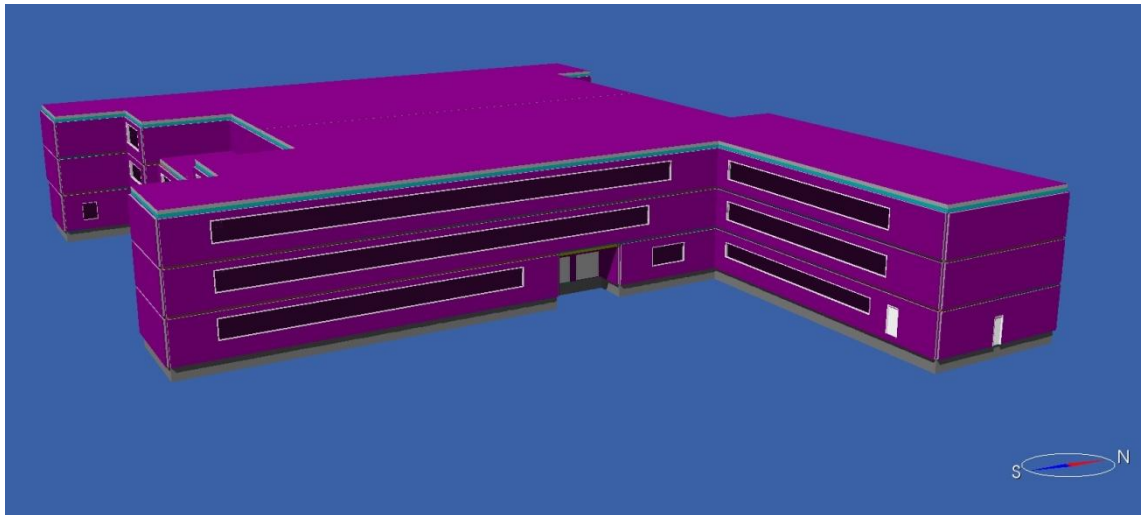
Osa rakennuksen luokista on mallinnettu monistamalla viereistä luokkarakennetta simulointimallissa (kuvassa 3.5 oranssit alueet) laskenta-ajan nopeuttamiseksi. Rakennuksen sisäisistä laite-, valaistus- ja henkilökuormista on taulukko *liitteessä 2*. Kuormat on pyritty jakamaan mahdollisimman hyvin todellisuutta vastaavasti. Sisäisistä kuormista on omat aikataulut on luokille, käytäville, erikoisluokille (kuten kuvaamataito ja musiikki), kirjastolle, ruokalalle, ilmastoinnille ja jatkuvasti päällä oleville sähkölait-

teille. Käytävien sähkölaitteet ja valot ovat päällä ilmastoinnin käyttöaikataulun mukaan, muuten kaikki opetukseen liittyvät sähkölaitteet ovat päällä 8-16 välisenä aikana. Käyttöajat on tarkemmin kuvattu *liitteessä 4*.

3.4.2 Yksinkertainen simulointimalli

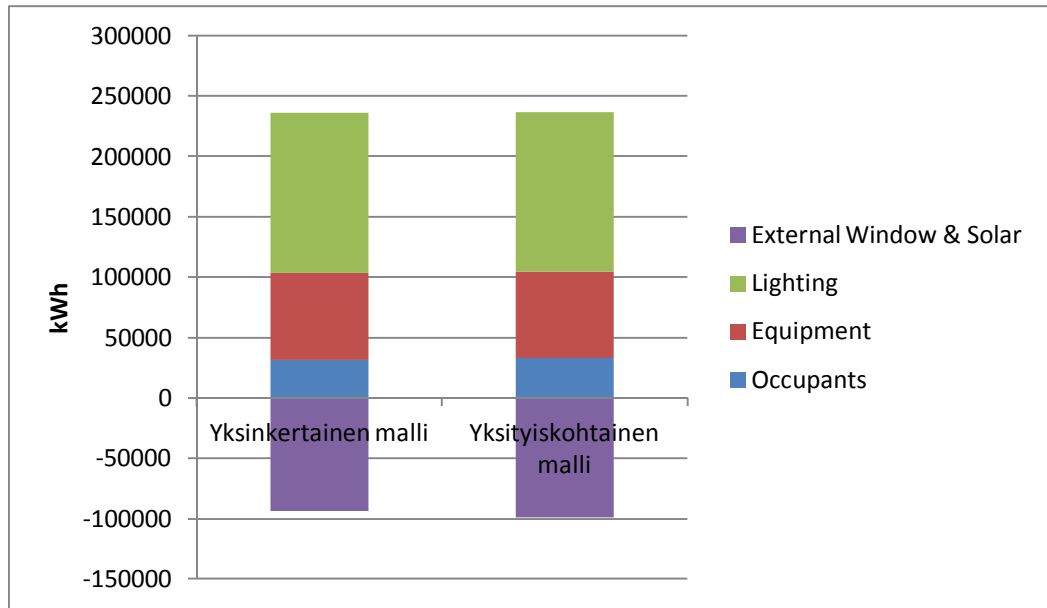
Myös koulun B tapauksessa yksinkertaisesta simulointimallista tehtiin kaksi eri versiota. Toista versiota korjattiin lisäämällä yksinkertaiseen simulointimalliin kolme $0,2 \text{ m}^2$:n kokoista aukkoa kuhunkin kerrokseen kuvaamaan porraskäytäviä. Asia on tarkemmin selitetty kappaleessa 3.6 Simulointimallien vertailua. Seuraavassa on kuvattu tarkemmin koulun B yksinkertaista simulointimallia.

Yksinkertainen malli vastaa vaipan rakenteeltaan ja ilmanvuotoluvuiltaan yksityiskohtaista simulointimallia lukuun ottamatta liikuntasalin kattoa sekä ikkunoita. Katto on yksinkertaisessa mallissa mallinnettu tasakattona ilman kattoikkunoita ja ikkunat puolestaan on mallinnettu kerroskohtaisesti kullakin seinällä yhtenä alana. Rakennus on mallinnettu sisältä kerroskohtaisina vyöhykkeinä kuten koulun A yksinkertaistettu simulointimalli. Rakennuksen väliseiniä on kompensoitu approksimoimalla niiden massaa yksinkertaistetun mallin sisäisenä termisenä massana.



Kuva 3.6. Koulun B yksinkertaistettu simulointimalli.

Rakennuksen sisäisten kuormien lukumäärä on laskettu kerroksittain kuten koulun A yksinkertaistetussa tapauksessa. Kuvaajassa 3.2 on esitetty simulointiohjelman laskemat sisäiset kuormat.



Kuvaaja 3.2. Yksinkertaisen ja yksityiskohtaisen simulointimallin sisäisten kuormien vuotuinen suuruus koulussa B.

Kuten koulun A tapauksessakin on myös koulun B taseissa nähtävissä eroa ikkunoiden osalta aukkoalojen eroista johtuen. Ero, 5300 kWh, on kuitenkin ainoastaan noin 1 % tilojen lämmitysenergiantarpeesta, joten se voidaan jättää tarkastelujen kannalta merkityksettömänä huomioimatta.

Ilmanvaihto on mallinnettu yhdellä tulo- ja poistokoneella, jonka poistoilmanvaihto on vanhan puolen ilmanvaihdon verran suurempi. Korvausilmareitit rakennuksen vanhassa osassa ovat kuten yksityiskohtaisessakin mallissa.

3.4.3 Rakentamismääräysten mukainen karkea malli

Koulun B Rakentamismääräysten mukainen malli vaipan rakenteeltaan yksinkertaistetun mallin mukainen, jossa jokainen kerros on oma vyöhykkeensä. Ilmavirrat on laskettu tilakohtaisesti rakentamismääräysten osan D2 mukaisesti, jonka jälkeen vyöhykekohtaiset ilmamäärät on saatu summaamalla kunkin kerroksen ilmanvaihtomäärät. Rakennuksen vanhassa osassa tuloilman oletettiin tulevan vaipan läpi. Tämä vastaa noin 40 % tuloilmavirrasta. Vanhan osan osuus ilmavirrasta laskettiin rakennuksen bruttoalojen suhteena. Poistoilmavirta mallinnettiin, kuten koulun A tapauksessa, 5 % tuloilmavirtaa suuremmaksi. Ilmavirrat on mallinnettu, kuten yksinkertaistetussakin mallissa yhden tulo-poistokoneen avulla.

Rakennuksen valaistus-, sähkö- ja ihmiskuormat ovat, kuten koulussa A, rakentamismääräyskokoelman D3 standardikäyttöä vastaavat 18 W/m^2 valaistukselle, 8 W/m^2 kuluttajalaitteille ja 14 W/m^2 ihmisten aiheuttamalle kuormalle. Ihmisten osalta on käytetty aineenvaihdunnan arvoa 1,2 met, jolloin yhden ihmisen kuorma on 126 W, kuten koulun A tapauksessa on todettu.

Myöskään koulun B tapauksessa rakentamismääräyskokoelman mukaisen mallin tekemiseen ei siis tarvittu mitään rakennuksen käyttöön liittyvää tietoa, vaan malliin on käytetty ainoastaan rakenteellista tietoa koulusta.

3.5 Energiansäästöinvestointien lähtötilanne

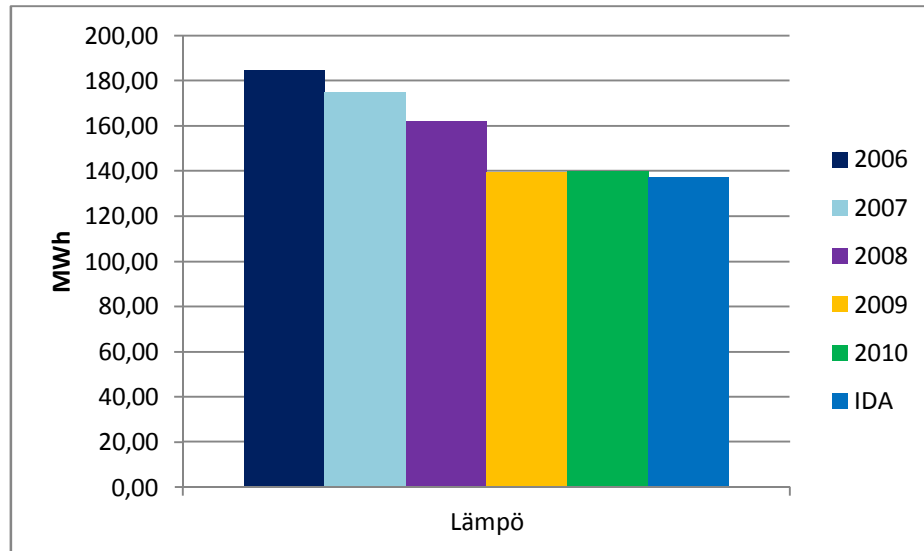
Energiansäästötoimenpiteiden kannattavuuden arvioimiseksi on valittava tarkastelulle lähtötila. Tutkimuksessa päädyttiin valitsemaan tarkastelun referenssitilaksi tila, jossa kouluissa on jo riittävä ja terveellinen ilmanvaihto. Tähän oletetaan päästävän molemmissa tarkasteltavissa kouluissa tehostamalla olemassa olevaa ilmanvaihtoa esimerkiksi ilmanvaihtokanavien siivoamisella ja puhaltimien korjauksilla. Mikäli tutkimuksen referenssitilaksi ei valittaisi laadukasta sisäilmaa edustavaa tilaa, jouduttaisiin ilmanlaadun paranemiselle kehittämään jonkinlainen taloudellinen arvo. Muussa tapauksessa energiansäästötoimenpiteiden tuloksena saatava mahdollinen kustannussäästö saattaisi kulua kokonaan ilmanlaadun parantamiseen eikä investointi tällöin vaikuttaisi houkuttelevalta.

Molemmissa kouluissa tilojen keskilämpötiloissa on merkittäviä eroja. Tämä johtuu sekä menoveden säätökäyrän virheellisyydestä että patteriverkoston epätasapainosta. IDA-simulointimalleissa epätasaisia huonelämpötiloja on helpointa mallintaa asettamalla tilakohtaiset lämmityksen tavoitelämpötilat vastaamaan mitattuja keskilämpötiloja mallin tilakohtaisten lämmitystehojen ollessa huomattavan ylimitoitettut. Todellisuudessa huonelämpötila muodostuu kuitenkin tilan rajallisen lämmitystehon ja häviöiden summasta. Koska energiansäästötoimenpiteet vaikuttavat tilojen lämpöhäviöön ja sitä kautta huonelämpötiloihin huonosti säädetyssä patteriverkostossa, on energiansäästöpotentialin selvittämisen kannalta parempi olettaa, että patteriverkoston perussäätö on ensimmäinen toimenpide kouluissa ja valita energiansäästösimulointien referenssitilaksi tila jossa huonelämpötilat ovat tasapainossa.

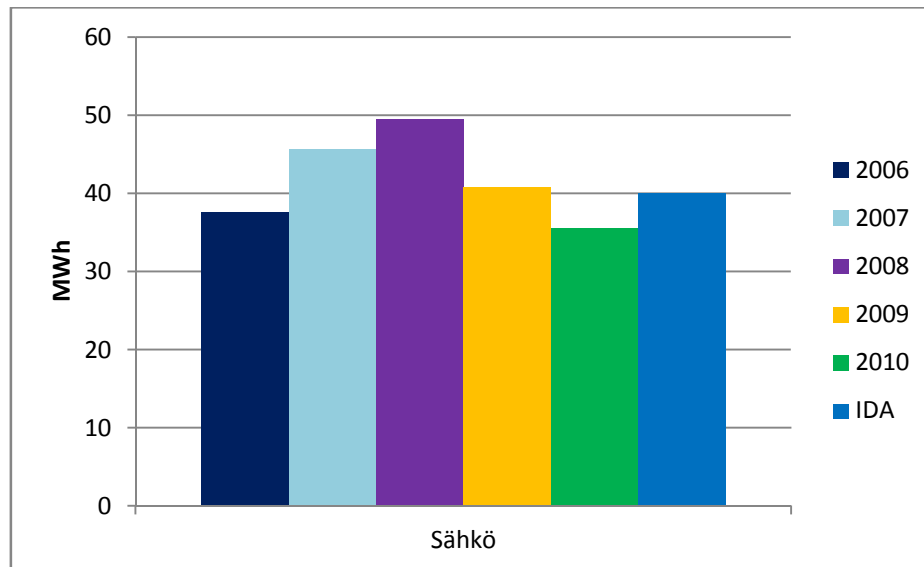
Patteriverkoston perussäädön vaikutusta arvioidaan kuitenkin tarkastelujen aluksi tekemällä mahdollisimman tarkasti alkuperäisiä lämpötiloja vastaava yksityiskohtainen simulointimalli. Seuraavassa on tarkasteltu molempien koulujen lähtötilannetta, jossa lämpötilat ovat mittausten mukaiset ja ilmanvaihto riittävä. Tätä tilannetta on verrattu koulun mitattuihin kulutustietoihin. Vertailuissa on käytetty ostoenergioita, eli lämmitysenergiankulutus sisältää myös käyttöveden lämmityksen.

3.5.1 Koulu A

Koulun A yksityiskohtainen simulointimalli rakennettiin mahdollisimman tarkaksi tiedossa olevien oppilasmäärien, ilmanvaihdon määrän, kulutustietojen, keskilämpötilojen ja rakenteellisten tietojen perusteella. Koska IDA-mallissa käytettiin Jyväskylän 1979 säädataa, normitettiin tilastoidut lämmitysenergiankulutukset kyseisiin säätietoihin jakamalla kulutus kunkin vuoden ja paikkakunnan lämmitystarveluvulla ja kertomalla Jyväskylän vuoden 1979 lämmitystarveluvulla. Näin kulutuksista saatiin vertailukelpoiset IDA-mallin kanssa. Kuvaajista 3.3 ja 3.4 käy ilmi koulun A todelliset vuosikulutukset ja IDA-mallin vuosikulutukset.

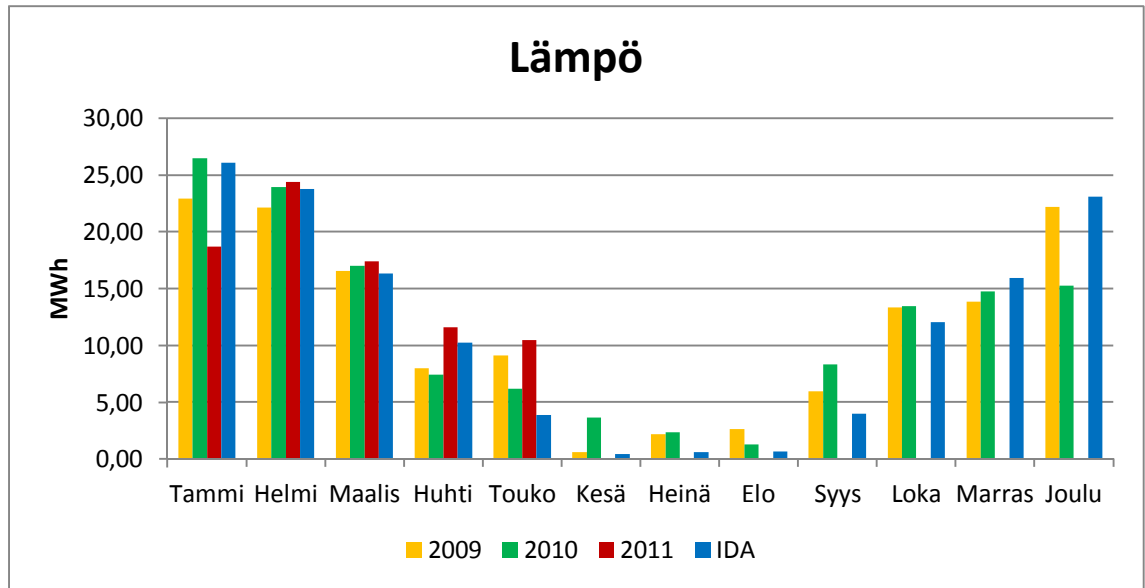


Kuvaaja 3.3. Koulun A, vuoteen 1979 normitetut vuosien 2006-2010 lämmönkulutukset verrattuna IDA-malliin. Lämmitysenergia sisältää käyttöveden lämmityksen.

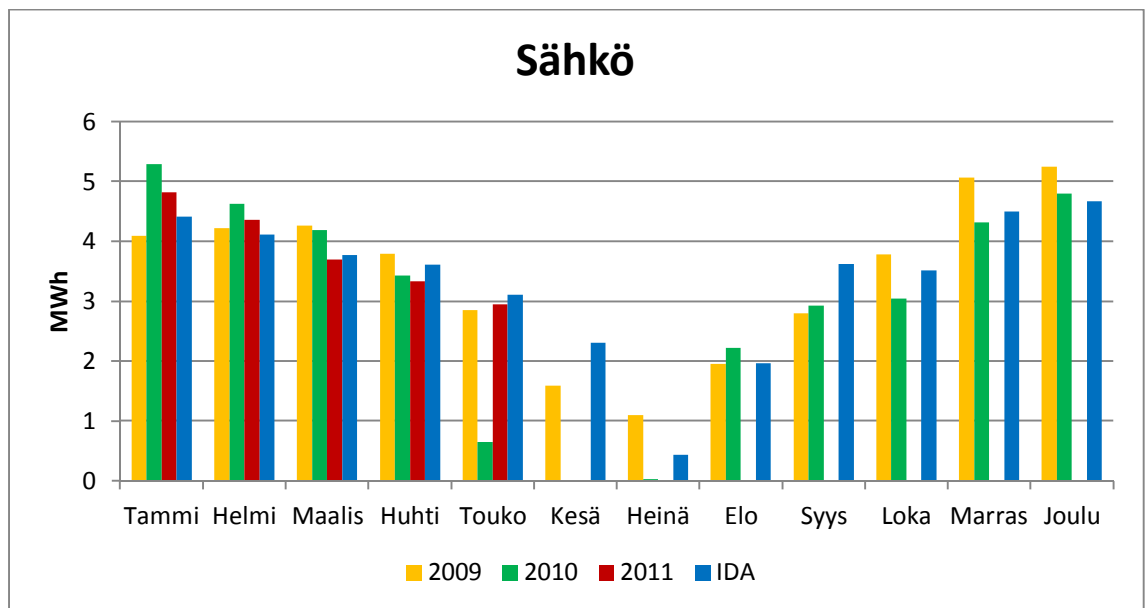


Kuvaaja 3.4. Koulun A sähkönkulutus vuosina 2006-2010 verrattuna IDA-malliin.

Kuvaajista voidaan nähdä, että koulun A sähkönkulutus IDA-mallissa pysyy todellisen kulutuksen vuosittaisen vaihtelun puitteissa. Lämmönkulutus vastaa myös hyvin viimeisen kahden vuoden osalta vuoden 1979 säätietoihin normitettuja lämmönkulutuksia. Vertailua tehtiin myös kuukausitasolla. Kuvaajissa 3.5 ja 3.6 on esitetty koulun A kuukausikulutuksia lämmön ja sähkön osalta ja verrattu niitä IDA-mallin vastaaviin kulutuksiin.



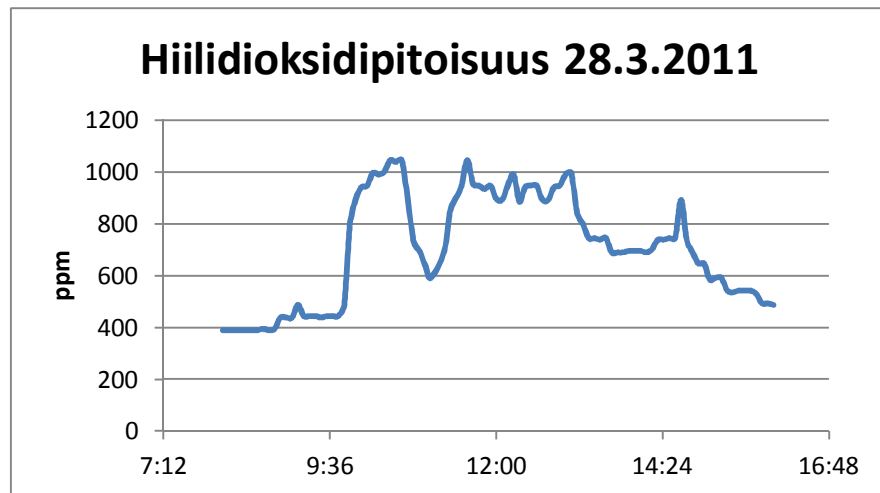
Kuvaaja 3.5. Koulun A, vuoteen 1979 normitettu lämmönkulutus kuukausittain vuosilta 2009-2011, sekä IDA-simulointimallin mukainen kuukausikulutus.



Kuvaaja 3.6. Koulun A sähkönkulutus kuukausittain vuosilta 2009-2011 verrattuna IDA-malliin.

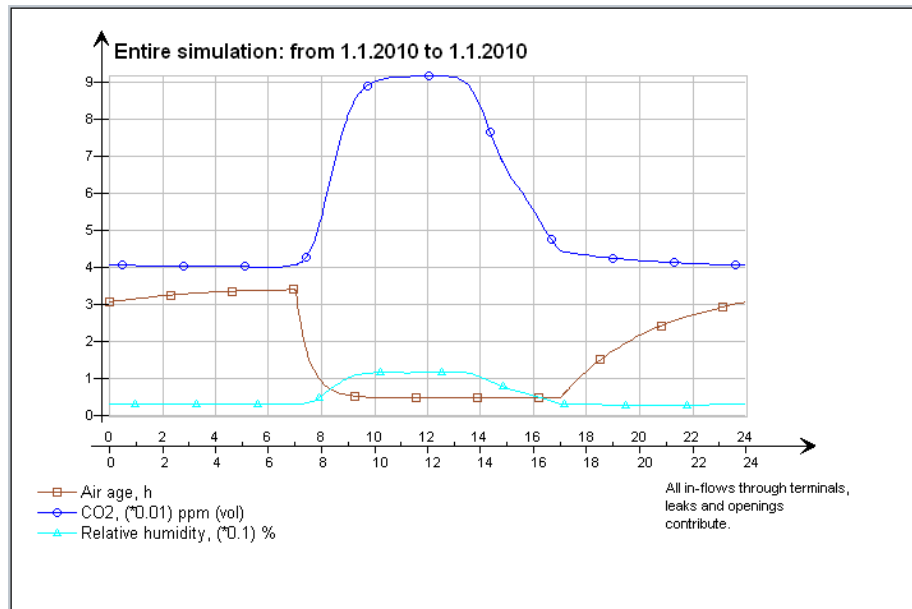
Kuvaajista nähdään, että kuukausikulutukset ovat suhteellisen lähellä toisiaan ja että IDA-malli antaa hyvän kuvan todellisesta kulutuksesta. Kesäkuukausien osalta sähkönkulutuksessa on epätarkkuutta, mutta koska tutkimuksessa keskitytään lämmönkulutuksen energiansäästöihin, voidaan mallin tarkkuus todeta riittäväksi.

Huoneilman hiilidioksidipitoisuus oli koululla A keskimäärin 900-1200 ppm:n välillä. Tilojen hiilidioksidipitoisuudet on mallinnettu mahdollisimman tarkasti IDA-malliin. Kuvaajassa 3.7 on esitetty erään luokan mitattu hiilidioksidipitoisuus yhden vuorokauden ajalta.



Kuvaaja 3.7. Mitattu hiilidioksidipitoisuus koulun A eräissä luokassa.

Kuvassa 3.7 on puolestaan esitetty vastaavan tilan hiilidioksidipitoisuus IDA-simulointimallissa.



Kuva 3.7. Simuloitu hiilidioksidipitoisuus koulun A eräissä luokassa.

Tilojen hiilidioksidipitoisuudet vastaavat IDA-mallissa todellisia arvoja suunnilleen samalla tavalla joka tilassa.

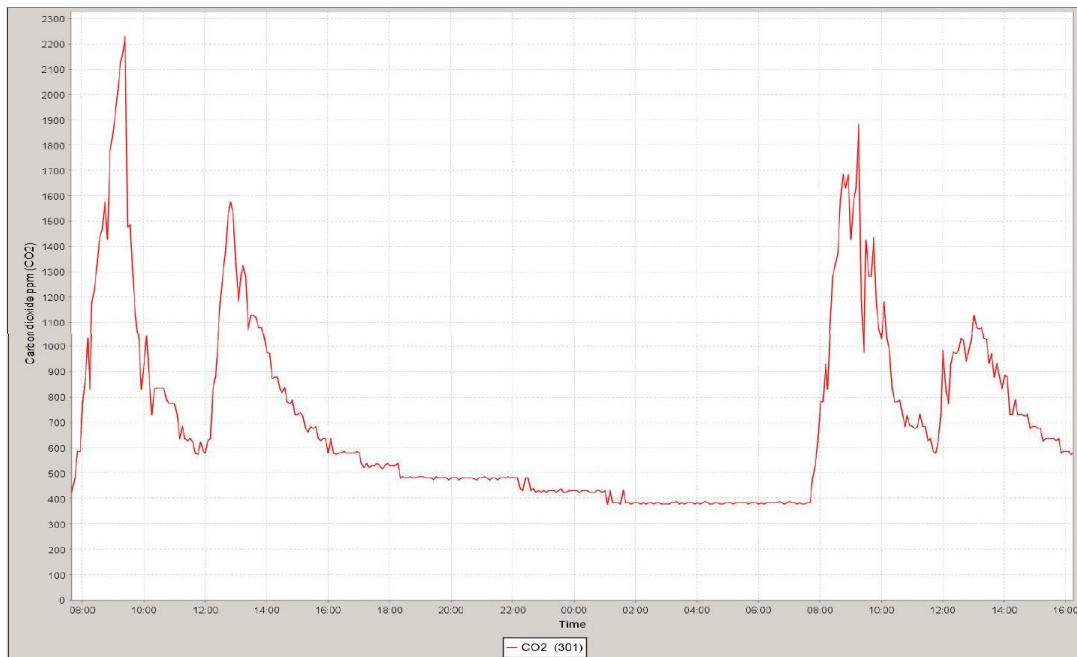
3.5.2 Koulu B

Johtuen puutteellisesta tiedonkulusta ja vanhoista laitteista on koulun B ilmanvaihto ollut puutteellista tutkimukseen liittyvän mittausjakson aikana. Kuten edellä todettiin, oli osa koulun vanhan osan huippumureista ollut pysähdyksissä ja ilmanvaihto luokissa siten riittämätöntä. Tätä oli yritetty kompensoida ikkunatuuletuksella jättämällä ikkunat auki joskus jopa yön yli. Liikuntasalin ilmanvaihto oli puolestaan ollut päällä erehdyksessä jatkuvasti muutamien kuukausien ajan. Näiden lisäksi tilojen keskilämpötilat ovat

koulussa puutteellisen menovesi- ja patteriverkostosäädön vuoksi systemaattisesti yli 21°C. Nämä tekijät nostavat koulun lämmitysenergian ja sähkön kulutusta mittausjaksolla.

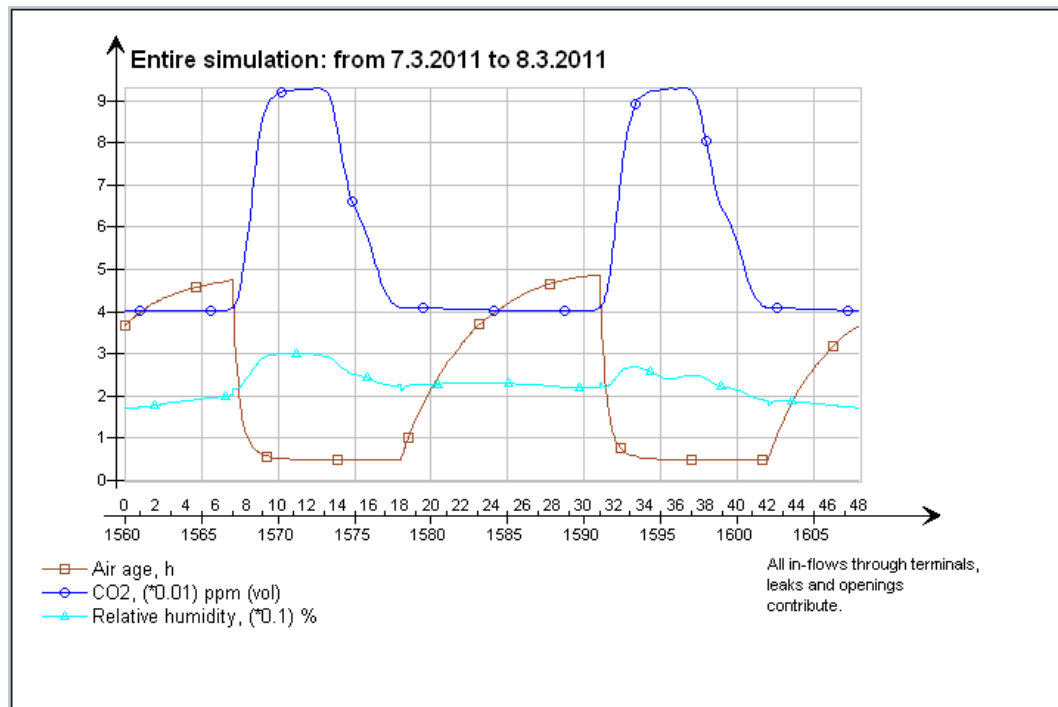
Kulutustietoihin verratun yksityiskohtaisen simulointimallin vaihtelevia huonelämpötiloja on mallinnettu mahdollisimman tarkasti jakamalla rakennus mitattujen keskilämpötilojen mukaan viiteen eri lämpötilatasoon tilan tyypin mukaan.

Koulun ilmanvaihto on mainittujen puutteiden takia ollut vuosikausia riittämätön. Tämä on johtanut korkeisiin hiilidioksidipitoisuuksiin tiloissa. Kuvassa 3.8 on esitetty erään vanhalla puolella sijainneen luokan hiilidioksidipitoisuus mittausjakson ajalta.



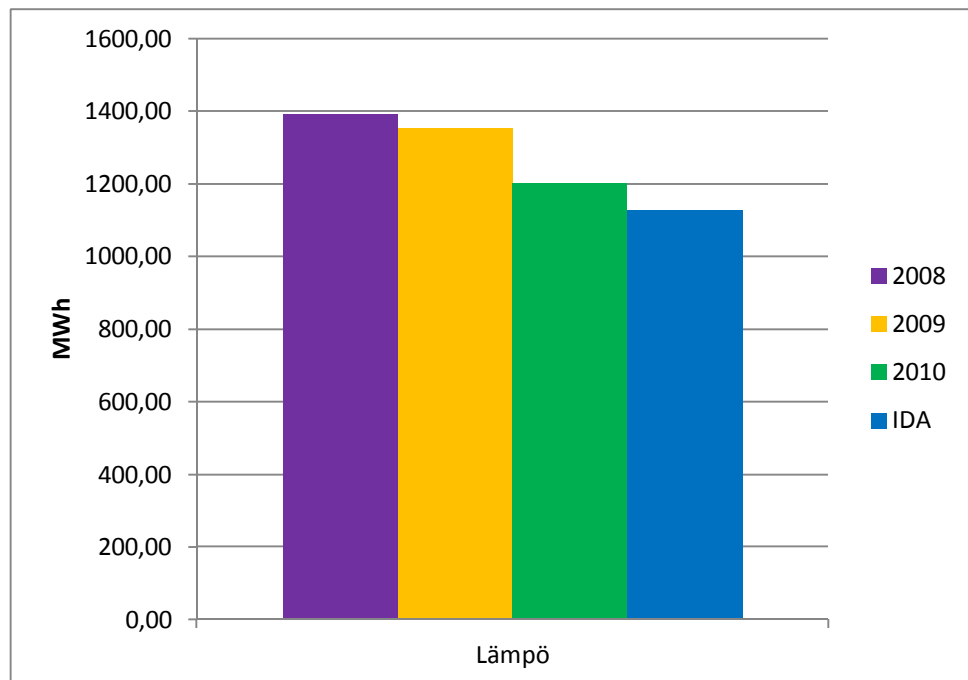
Kuva 3.8. Koulun B vanhassa osassa sijaitsevan erään kolmannen kerroksen luokan hiilidioksidipitoisuus aikavälillä 7.3.-8.3.2011.

Kuvasta nähdään, että hiilidioksidipitoisuudet ylittävät sallitun 1200 ppm rajan reippaasti. Kuten edellä todettiin, simulointimallin referenssitilaksi valittiin tila jossa ilmanvaihto on jo riittävällä tasolla. Taso vastaa suunnilleen sisäilmaluokituksen tasoa S3. Kuvassa 3.9 on esitetty Kuvaa 3.4 vastaavan luokan hiilidioksidipitoisuus koulusta rakennetussa IDA-simulointimallissa.

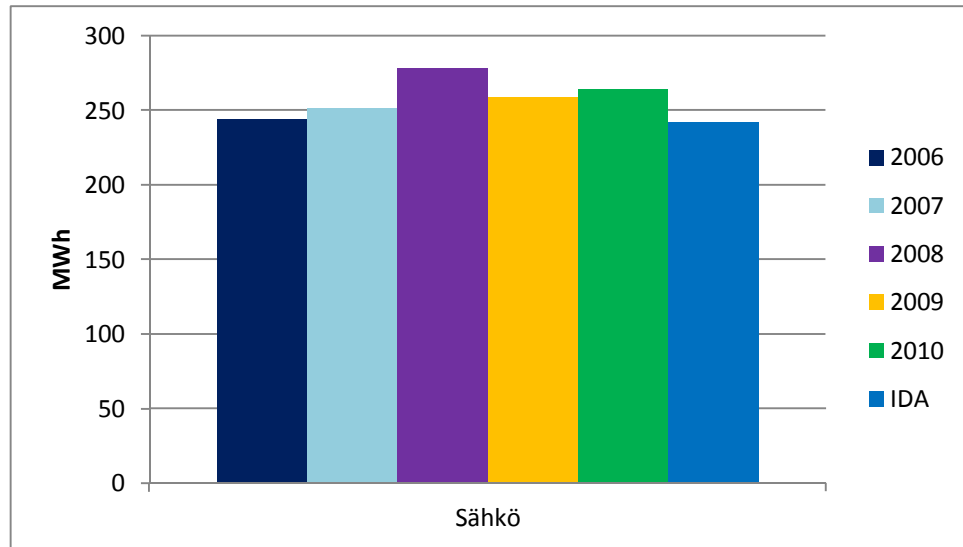


Kuva 3.9. Erään kolmannen kerroksen luokan hiilidioksidipitoisuus koulun B IDA-mallissa.

IDA-simulointimalli rakennettiin, ilmamääriä lukuun ottamatta, mahdollisimman tarkasti todellisia kulutustietoja vastaavaksi. Säädatana käytettiin vuoden 1979 Jyväskylän dataa. Mallin rakentamisessa käytettiin hyödyksi koulun tietoja oppilasmäärän ja rakenteellisten tietojen osalta. Kuvaajissa 3.8 ja 3.9 on verrattu todellisia sähkön- ja vuoteen 1979 normitettuja, lämmönkulutuksia IDA-simulointimallin vuosikulutuksiin.

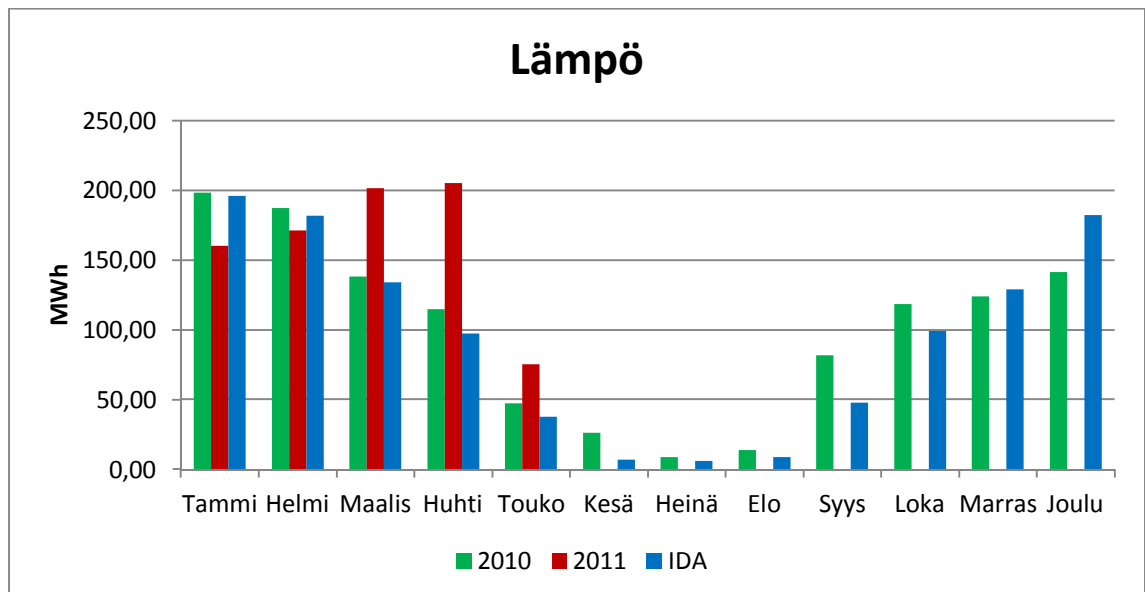


Kuvaaja 3.8. Koulun B, vuoden 1979 säätieloihin normitetut lämmönkulutukset vuosilta 2008-2010 verrattuna IDA-simulointimalliin. Lämmitysenergiana on käytetty ostoenergiankulutusta, eli lämpimän käyttöveden lämmitys on mukana.

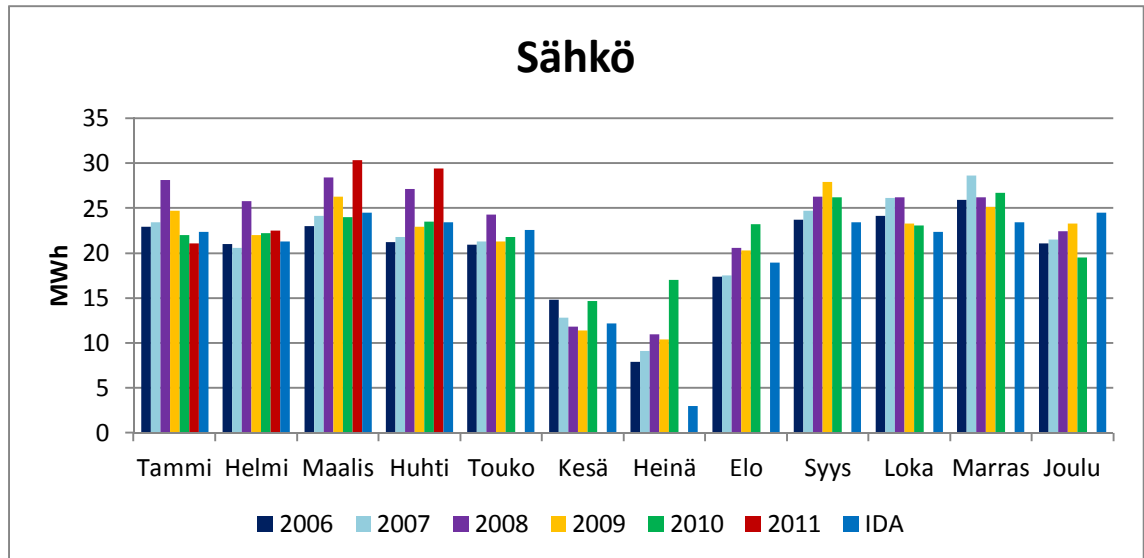


Kuvaaja 3.9. Koulun B sähkönkulutukset 2006-2010 verrattuna IDA-malliin.

Lämmönkulutusten normitus tapahtui kuten koulun A tapauksessakin jakamalla tilastoidut lämmönkulutukset kyseisen vuoden ja paikan lämmitystarveluvulla ja kertomalla ne IDA-ohjelmistossa käytetyn Jyväskylän vuoden 1979 lämmitystarveluvulla. Kuvaajista nähdään, että IDA-mallin sähkönkulutus on normaalin vuosivaihtelun rajoissa. Lämmön kulutuksen osalta nähdään vuosien 2008-2010 osalta laskeva trendi. Ottaen huomioon, että koululla ei ole tehty mitään rakenteellisia energiatehokkuuteen liittyviä parannuksia kyseisen ajanjakson aikana, voidaan IDA-mallia pitää riittävän tarkkana. Kulutuksen laskulle ei ole tiedossa yksiselitteistä syytä. Kulutuksia verrattiin myös kuukausitasolla. Kuvaajissa 3.10 ja 3.11 on esitetty koulun B lämmön ja sähkön kuukausikulutuksia niin pitkältä ajalta, kun kyseisiä tilastoja oli saatavilla ja verrattu niitä IDA-mallin kuukausikulutuksiin.



Kuvaaja 3.10. Koulun B, vuoteen 1979 normitetut kuukausittaiset lämmönkulutukset verrattuna yksityiskohtaiseen IDA-malliin. Arvot sisältävät lämpimän käyttöveden lämmityksen.



Kuvaaja 3.11. Koulun B sähkönkulutus kuukausittain verrattuna yksityiskohtaiseen IDA-malliin.

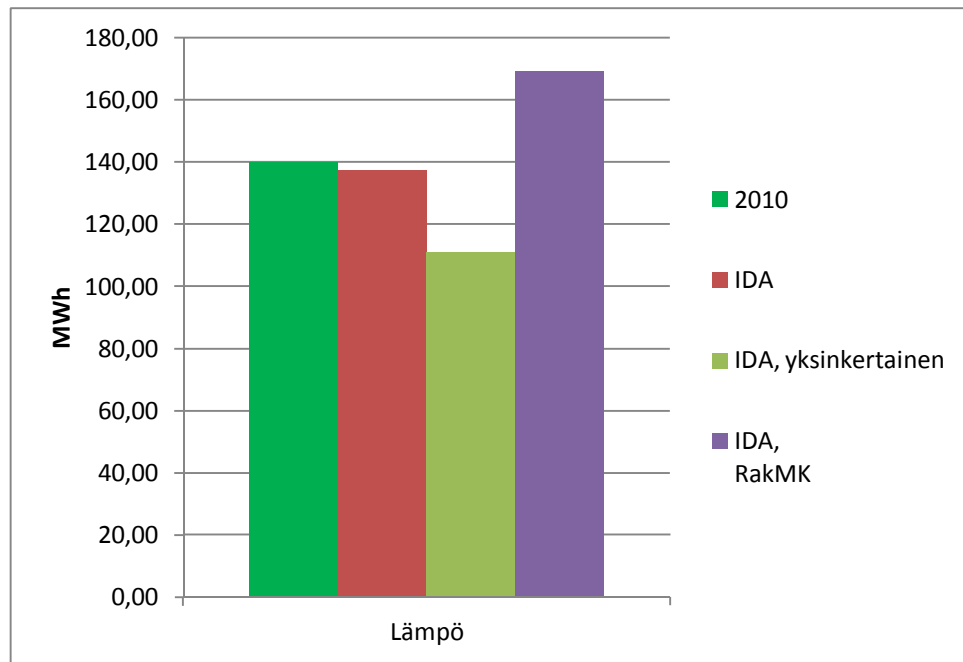
Kuvaajista nähdään muun muassa keväällä 2011 päälle unohtuneiden liikuntasalin tuolilmapuhaltimien vaikutus sähkön- ja lämmönkulutukseen. Heinäkuun sähkönkulutuksen osalta mallia ei yritetty saada paremmin vastaamaan todellisuutta, sillä koululla on silloin auki ainoastaan koulun tiloissa toimiva kirjasto, eikä muista päällä olevista laitteista ollut tarkempaa tietoa. Lisäksi energiansäästötarkasteluissa keskitytään lähinnä lämmitysenergiankulutuksen pienentämiseen.

3.6 Simulointimallien vertailua

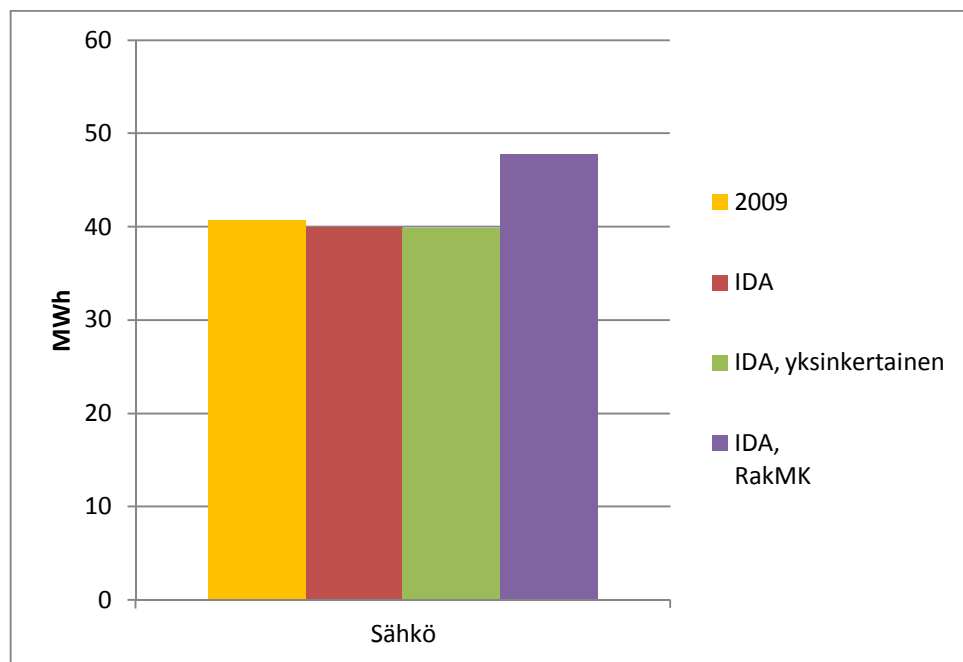
Edellisessä kappaleessa todettiin, että yksityiskohtainen simulointimalli kuvaa energian säästön selvittämisen kannalta riittävällä tarkkuudella todellista tilannetta kouluissa. Seuraavassa on vertailtu eri simulointimallien ostoenergiankulutuksia keskenään lähtötilanteessa. Yksinkertaisessa simulointimallissa on otettu huomioon huonelämpötilojen vaihtelu kerroksittain laskemalla huoneiden tilavuuksilla painotetut keskilämpötilat kullekin kerrokselle. Rakentamismääräysten mukaisessa mallissa vyöhykkeiden lämpötilat ovat 21°C.

3.6.1 Koulu A

Kuvaajissa 3.12 ja 3.13 on esitetty eri IDA-simulointimallien keskinäinen ero lämmön- ja sähkönkulutuksessa. Lisäksi kuvaajassa on esitetty viimeisimpien vuosien todelliset kulutukset vertailukohdaksi.



Kuvaaja 3.12. Koulun A IDA-simulointimallien lämmönkulutukset verrattuna vuoden 2010 todelliseen kulutukseen. Kulutuksissa on mukana käyttöveden lämmitys.

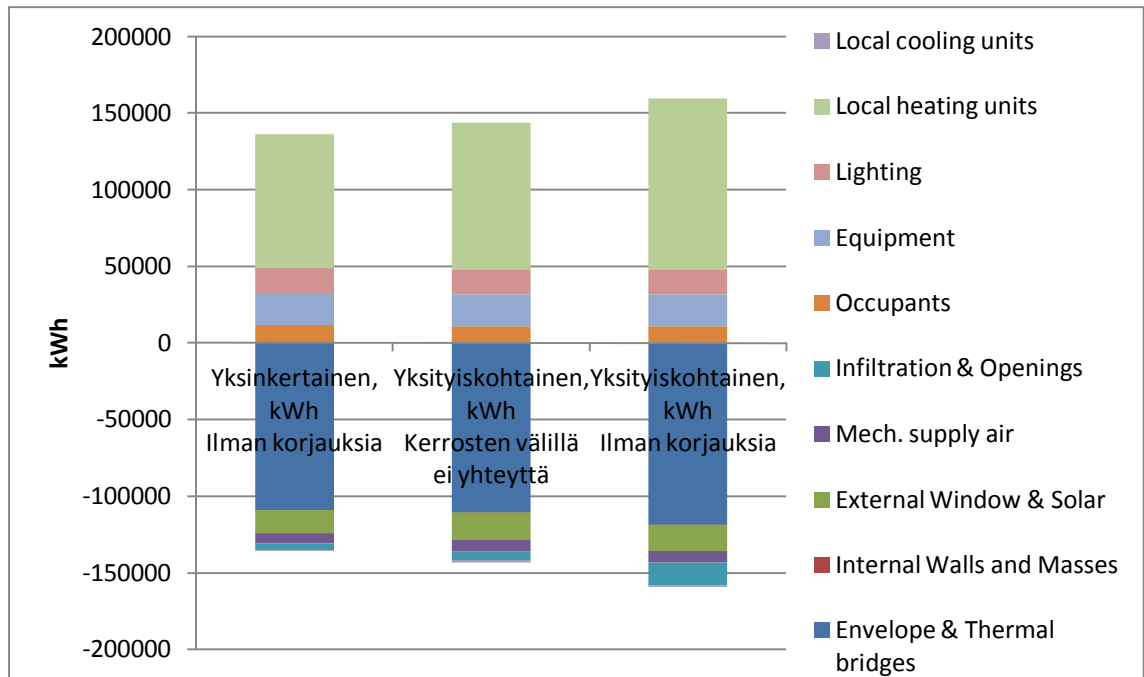


Kuvaaja 3.13. Koulun A IDA-simulointimallien sähkönkulutukset verrattuna vuoden 2009 todelliseen kulutukseen.

Sähkönkulutuksen osalta vertailuvuodeksi on valittu vuosi 2009, sillä vuoden 2010 sähkönkulutustilasto oli toukokuun osalta virheellinen. Kuvaajista nähdään, että sekä lämmön että sähkönkulutukset ovat rakentamismääräysten mukaisessa simulointimallissa liian suuret verrattuna todelliseen kulutukseen. Tämä johtuu selvästi suuremmasta, rakentamismääräysten mukaisesta ilmanvaihtomäärästä, joka lisää sekä lämmön- että puhtaimien kautta myös sähkön kulutusta. Yksinkertaistetussa mallissa puolestaan säh-

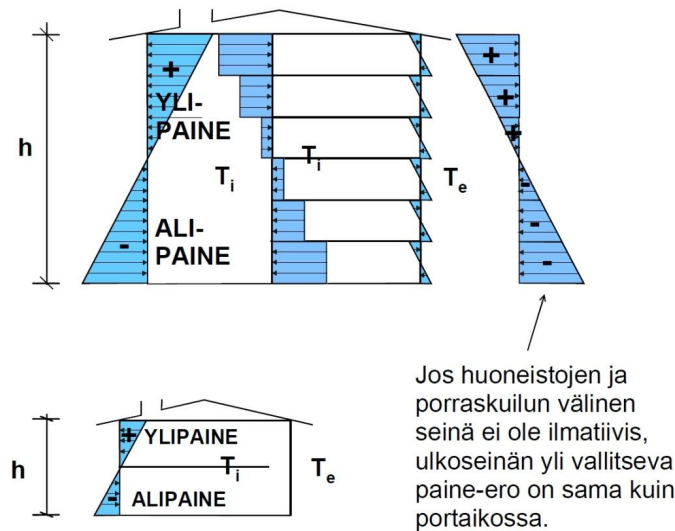
könkulutus vastaa todellista kulutusta varsin hyvin, mutta tilojen lämmitystarpeessa on 22 % ero.

Syy yksinkertaisen mallin huomattavasti pienemmälle lämmönkulutukselle löytyy, kun vertaillaan eri simulointimallien taseita. Suurimmat erot simulointimallien välillä löytyvät vaipan lämpöhäviöistä ja aukkojen kautta tapahtuvista lämpöhäviöistä. Yksinkertaisessa mallissa kerrosten välisen vuotoilmareitin puuttuminen pienentää lämpöhäviötä ullakon kautta. Poistamalla kerrosten väliset reiät yksityiskohtaisen mallin porraskäytävistä pienenee yksityiskohtaisen ja yksinkertaisen mallin tilojen lämmitystarpeiden ero 9 %:iin. Kuvaajassa 4.4 on verrattu yksityiskohtaista ja yksinkertaista simulointimallia, joissa kummassakaan ei ole kerrosten välistä yhteyttä, yksityiskohtaiseen simulointimalliin, jossa kerrosten välillä on normaalisti porraskäytävät.



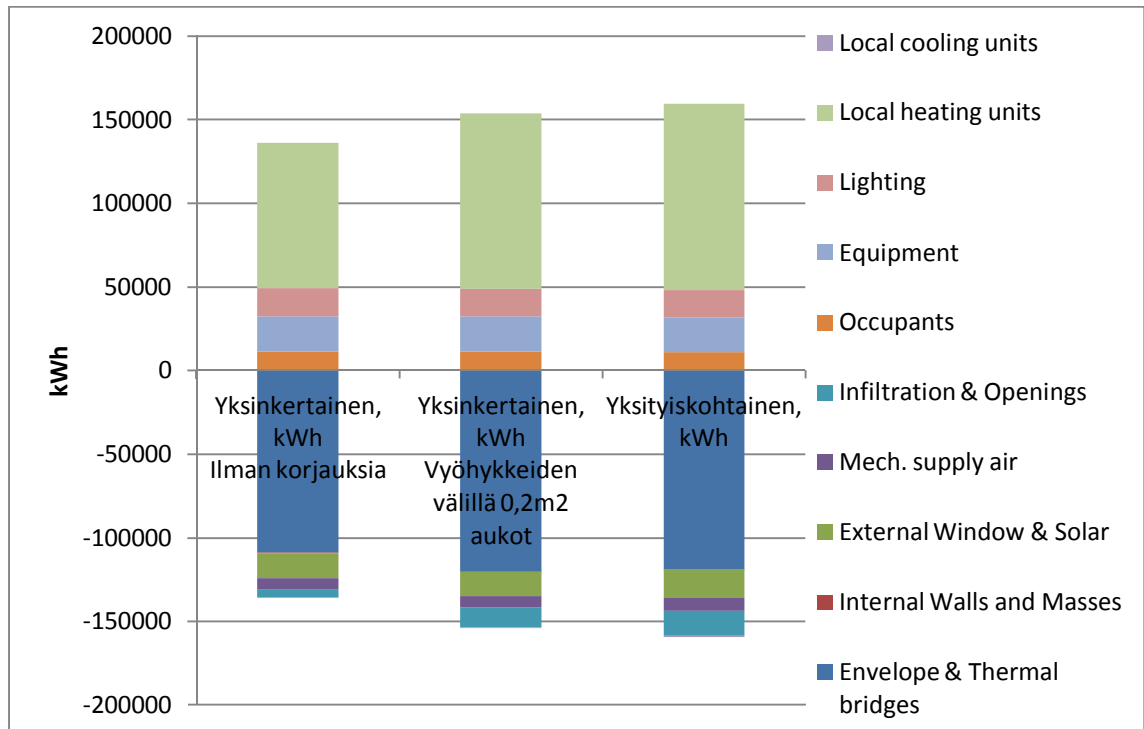
Kuvaaja 3.14. Koulun A yksityiskohtainen simulointimalli ilman kerrosten välisiä aukkoja verrattuna yksinkertaiseen simulointimalliin.

Kuvaajasta nähdään, että mallit vastaavat kerrosten väliset aukot poistamalla paremmin toisiaan. Tämä johtuu niin sanotusta savupiippuvaikutuksesta. Porraskäytävissä lämmin ilma nousee ylöspäin ja aiheuttaa siten rakennuksen ylä- ja alakertaan suuremmat paine-erot rakennuksen sisä- ja ulkopuolten välille kuin rakennuksessa, jossa ei ole porraskäytäviä laisinkaan. Etenkin ilmastoinnin käyttöaikojen ulkopuolella terminen paine-ero aiheuttaa huomattavasti suuremman vuotoilman alimpiin kerroksiin ja ylipaineen kautta vastakkaisen virtauksen kylmälle ullakolle. Yhdessä nämä tekijät kasvattavat rakennuksen lämpöhäviötä vaipan läpi. Kuvassa 3.10 on havainnollistettu ilmiötä.



Kuva 3.10. Rakennuksen korkeuden ja porraskuilun vaikutus vuotoilmaan havainnollistettuna. (Vinha, 2011, s. 392)

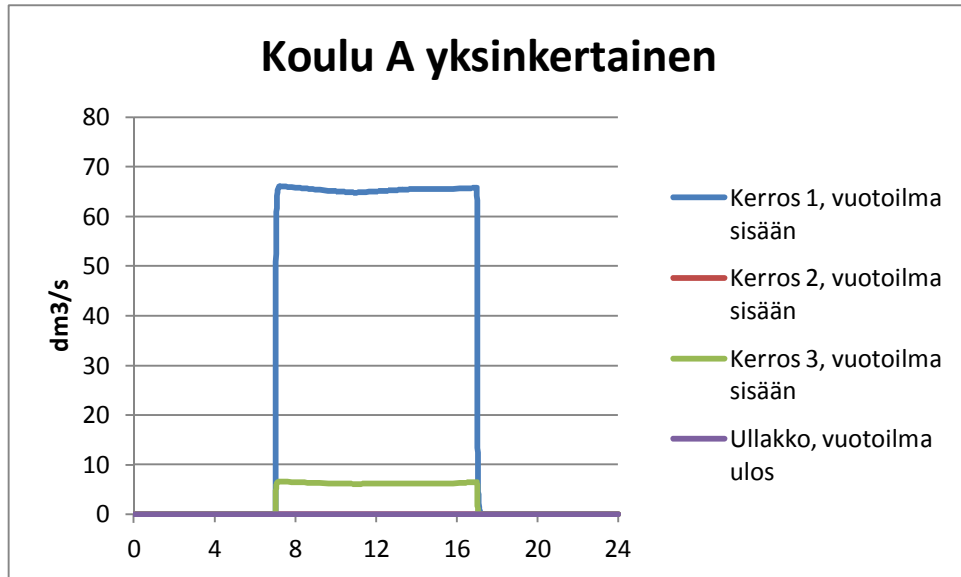
Kun kerrosten välinen yhteys poistetaan, on tämä ilmiö huomattavasti pienempi. Pieniä eroja aiheuttavat edelleen erot laskennallisessa vaipan alassa ja ikkunoiden aukkoalassa. Mikäli yksityiskohtaisesta mallista poistettaisiin kerrosten väliset aukot, ei malli kuitenkaan enää vastaisi todellisuutta. Tästä syystä päädyttiin ratkaisemaan ongelma sijoittamalla yksinkertaiseen malliin vuotoilmareitit, joilla mallinnetaan porraskäytävien vaikutusta. Kerrosten välisten vuotoaukkojen kooksi valittiin kokeilujen perusteella 4 Pa paine-eron vallitessa $0,2 \text{ m}^2$. Kuvaajassa 3.15 on esitetty simulointiohjelman laskemat ta-
seet eri malleille.



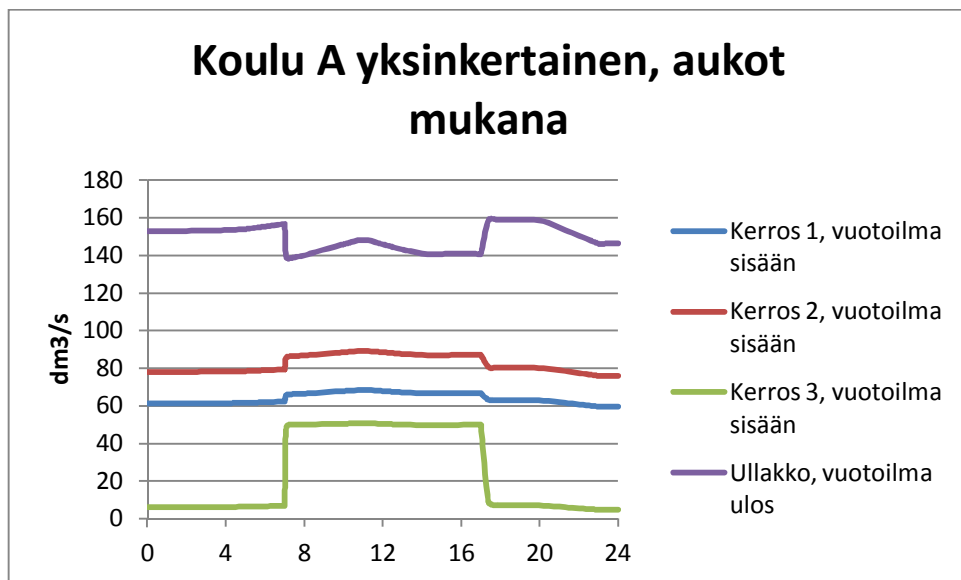
Kuvaaja 3.15. Koulun A yksinkertainen simulointimalli kerrosten välisellä vuotoreitillä ja ilman verrattuna yksityiskohtaiseen simulointimalliin.

Kuvaajasta nähdään, että vuotoreittien lisääminen yksinkertaiseen malliin kasvattaa mallin tilojen lämmitystarvetta lähelle yksityiskohtaisen mallin tasoa. Ero tilojen lämmitystarpeessa korjauksen jälkeen on enää noin 6 %. Pieniä eroja taseista löytyy edelleen esimerkiksi rakennuksen vaipan ja ikkunoiden osalta.

Kuvaajissa 3.16 ja 3.17 on verrattu välipojissa olevien aukkojen vaikutusta rakennuksen vuotoilmavirtoihin.



Kuvaaja 3.16. Koulun A yksinkertaisen simulointimallin päivittäiset vuotoilmavirrat kun kerrosten välillä ei ole yhteyttä.

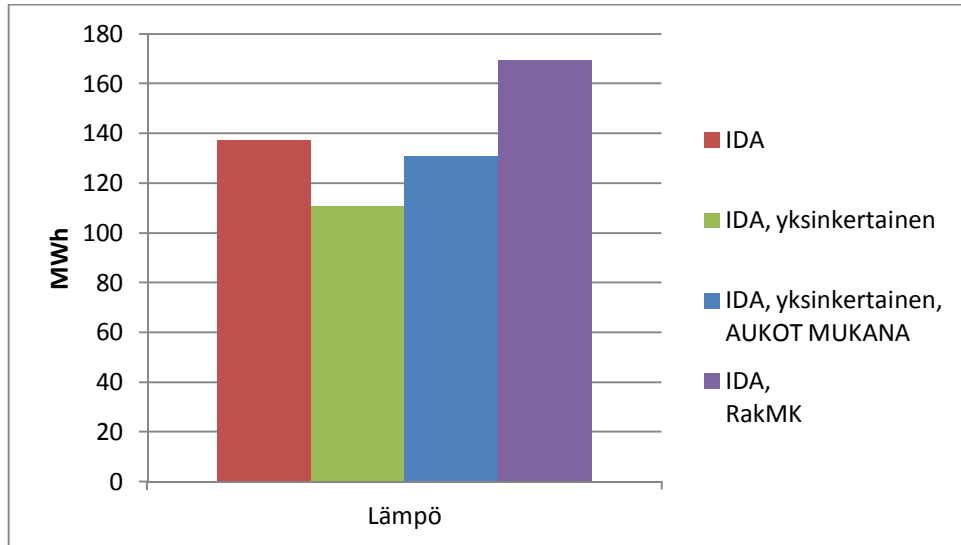


Kuvaaja 3.17. Koulun A yksinkertaisen simulointimallin päivittäiset vuotoilmavirrat kun kerrosten välillä on yhteys.

Kuvaajista nähdään, että vuotoilma-aukkojen lisäämisellä on dramaattinen vaikutus rakennuksen vuotoilmavirtoihin. Muutos on erityisen suuri ilmanvaihdon käyttöaikojen ulkopuolella.

Korjauksen jälkeen yksinkertaista simulointimallia voidaan käyttää energiansäästövertailuissa yksityiskohtaista simulointimallia vasten. Kuvaajassa 3.18 on esitetty

yhteenvedona eri simulointimallien ostoenergiaan perustuvat lämmitysenergiankulutukset yksinkertaisen simulointimallin korjauksen jälkeen.

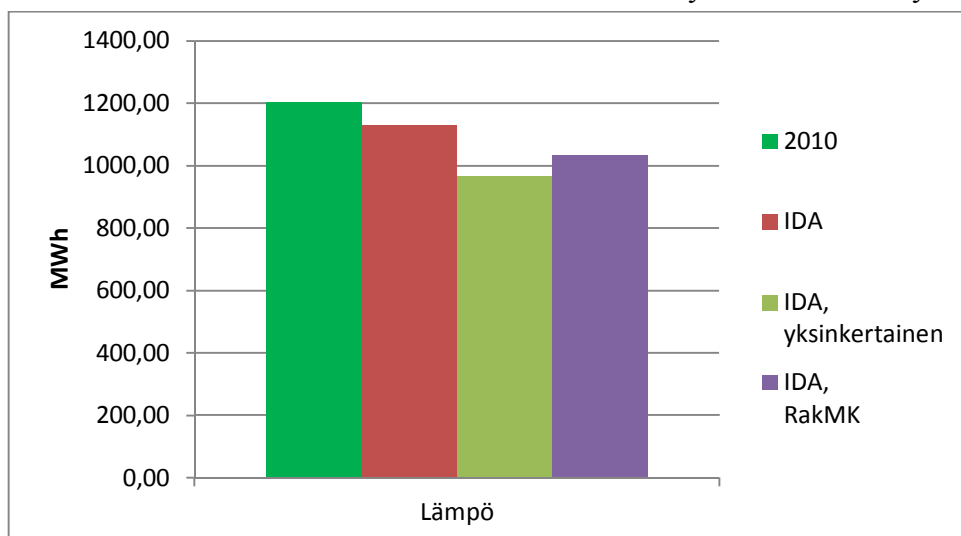


Kuvaaja 3.18. Eri simulointimallien lämmitysenergiankulutukset yksinkertaisen simulointimallin korjauksen jälkeen. Kulutuksissa on mukana käyttöveden lämmitys.

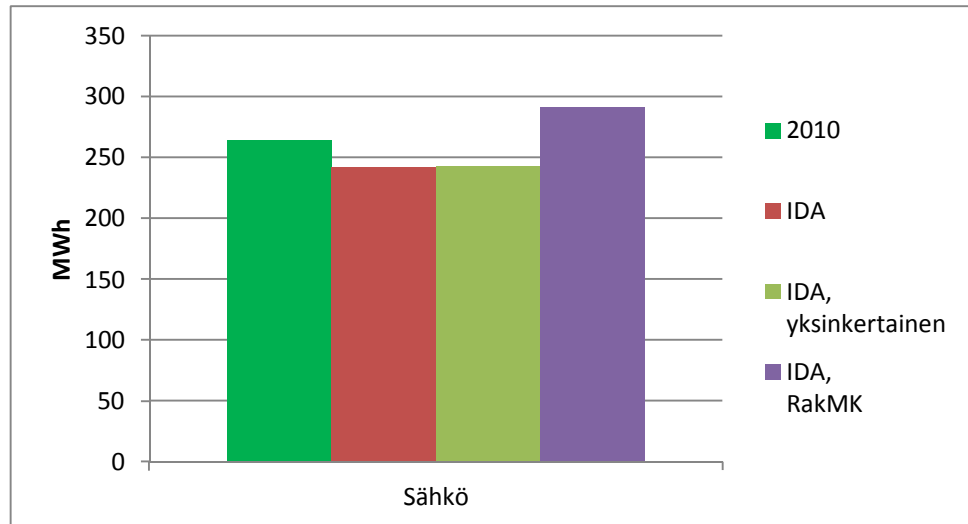
Kuvaajasta nähdään, että korjauksen jälkeen yksinkertaisen simulointimallin ostoenergiankulutukset ovat riittävän lähellä yksityiskohtaisen simulointimallin mukaisia kulutuksia. Rakentamismääräysten mukainen malli ei vastaa kulutuksiltaan yksityiskohtaista simulointimallia johtuen suurista ilmamääristä, mutta sen ja alkuperäisen yksinkertaisen simulointimallin avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä erilaisten energiansäästötoimenpiteiden herkkyyksistä tulevilla tarkasteluilla.

3.6.2 Koulu B

Kuvaajissa 3.19 ja 3.20 on esitetty kolmen eri simulointimallin vuotuiset sähkön- ja lämmönkulutukset. Lämmönkulutukset sisältävät käyttöveden lämmityksen.



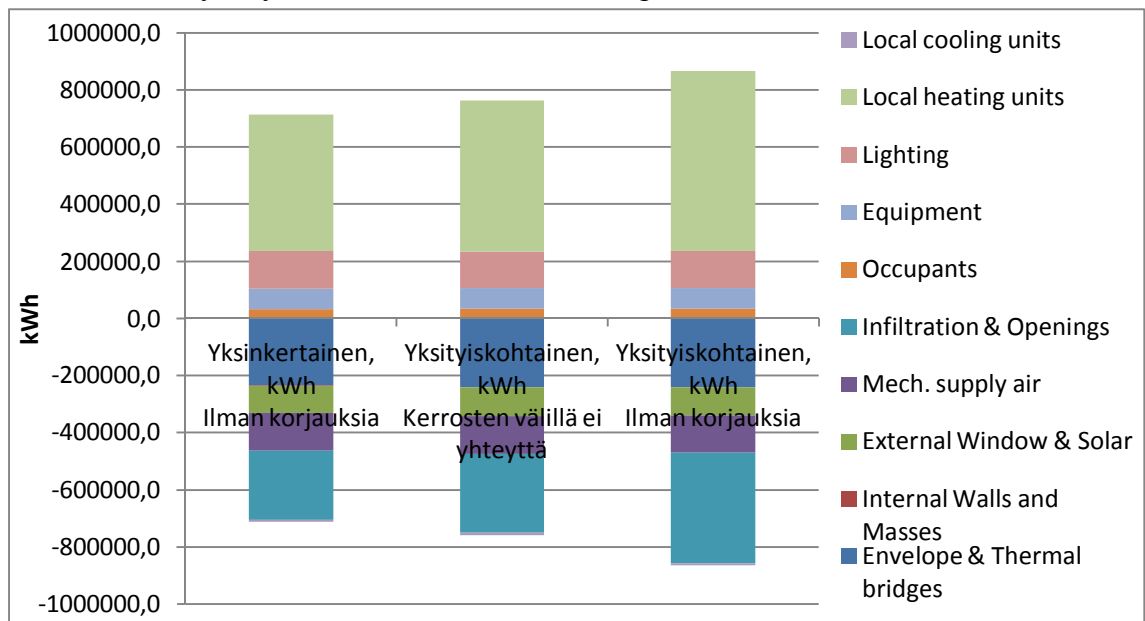
Kuvaaja 3.19. Koulun B IDA-simulointimallien lämpöenergiankulutukset verrattuna vuoden 2010 kulutukseen. Kulutuksissa on mukana käyttöveden lämmitys.



Kuvaaja 3.20. Koulun B IDA-simulointimallien sähköenergiansiirrot verrattuna vuoden 2010 kulutukseen.

Kuvaajista nähdään, että lämmönkulutuksen osalta rakentamismääräysten mukainen karkea malli ei suuren ilmanvaihtomääränsä vuoksi poikkea paljoa todellisesta kulutuksesta, mutta sähkökulutuksen puolesta ero on selkeä. Verrattuna kouluun A vastaa rakentamismääräysten mukainen malli kuitenkin hieman paremmin todellista vuosikulutusta. Yksinkertaisen mallin tapauksessa sähkökulutus ei paljoa poikkea todellisesta, mutta lämmönkulutus on huomattavasti todellista pienempi.

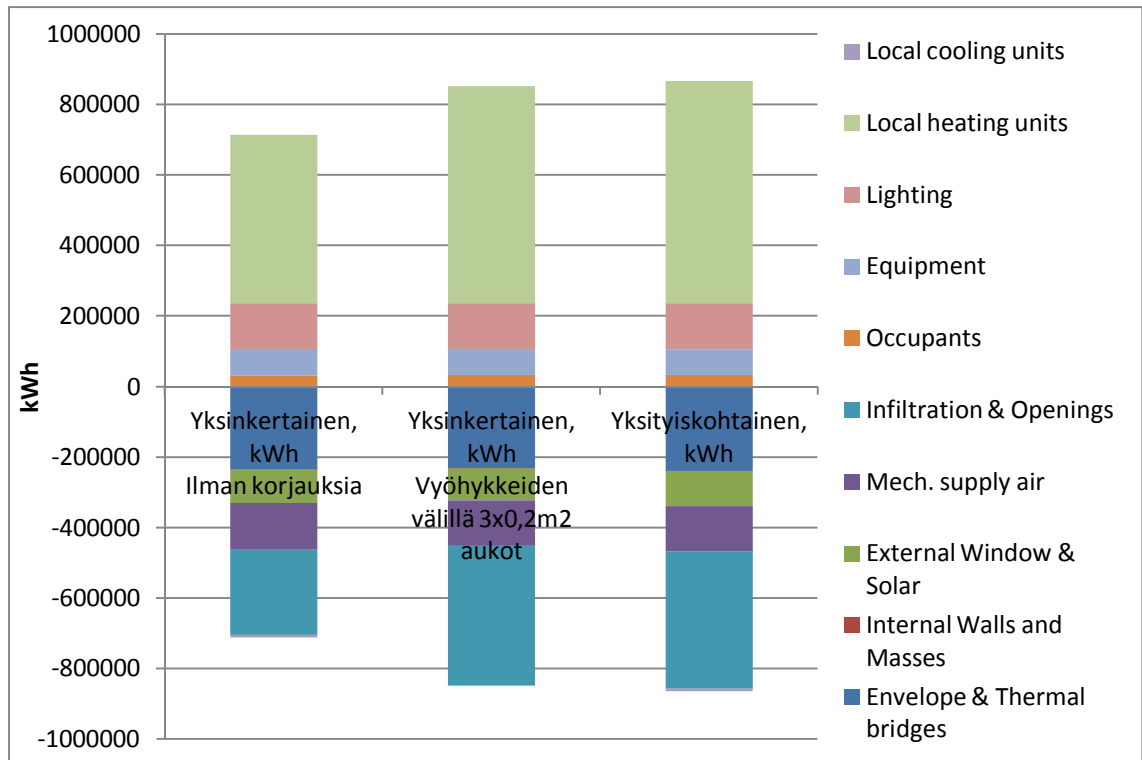
Syy yksinkertaisen mallin huomattavasti pienemmälle lämmitysenergian tarpeelle selviää, kuten koulun A tapauksessakin, taseita tarkastelemalla. Ylivoimaisesti suurin ero yksityiskohtaisen ja yksinkertaisen mallin välillä on aukkojen kautta tapahtuvissa häviöissä ja vuotoilmassa, jotka ovat yhteensä 146 MWh suuremmat yksityiskohtaisessa kuin yksinkertaisessa simulointimallissa. Kuvaajassa 3.21 on esitetty sisäiset kuormat tilanteelle, että yksityiskohtaisestakin mallista on poistettu kerrosten väliset aukot.



Kuvaaja 3.21. Koulun B yksityiskohtainen simulointimalli ilman kerrosten välisiä aukkoja verrattuna yksinkertaiseen simulointimalliin.

Kuvaajasta nähdään, että poistamalla kerrosten välinen yhteys mallien taseet vastaavat toisiaan huomattavasti paremmin. Ero huoneiden lämmitysenergiankulutuksessa on 9 %, kun se yksityiskohtaisen simulointimallin aukot huomioiden on 18 %. Tämä johtuu samasta ilmiöstä kuin koulun A tapauksessakin. Vaikka koulussa B ei ole kylmää ullakotilaa, kasvavat lämpöhäviöt merkittävästi kerrosten välisten vuotoreittien myötä. Kasvu ei siis johdu *kerrosten välisten* aukkojen ("openings") olemassaolon vuoksi suoraan, vaikka se taseessa saattaa siltä näyttää, vaan kyseisten aukkojen myötä vahvistuvan ns. savupiippuilmion ja sen voimistavan vuotoilmavirran myötä. Etenkin ilmanvaihdon käyttöaikojen ulkopuolella terminen paine-ero aiheuttaa rakennuksen korkeuden vuoksi huomattavasti voimakkaamman vuotoilmavirran alakerrassa sisään rakennukseen ja yläkerrassa ulos rakennuksesta. Seinien aukkojen ja vaipan läpi virtaavista vuotoilmavirroista johtuvat häviöt siis kasvavat. Ilmiön voimakkuutta edesauttaa se, että rakennuksen ilmanvuotoluku on arvioitu erittäin heikoksi, 5 l/h.

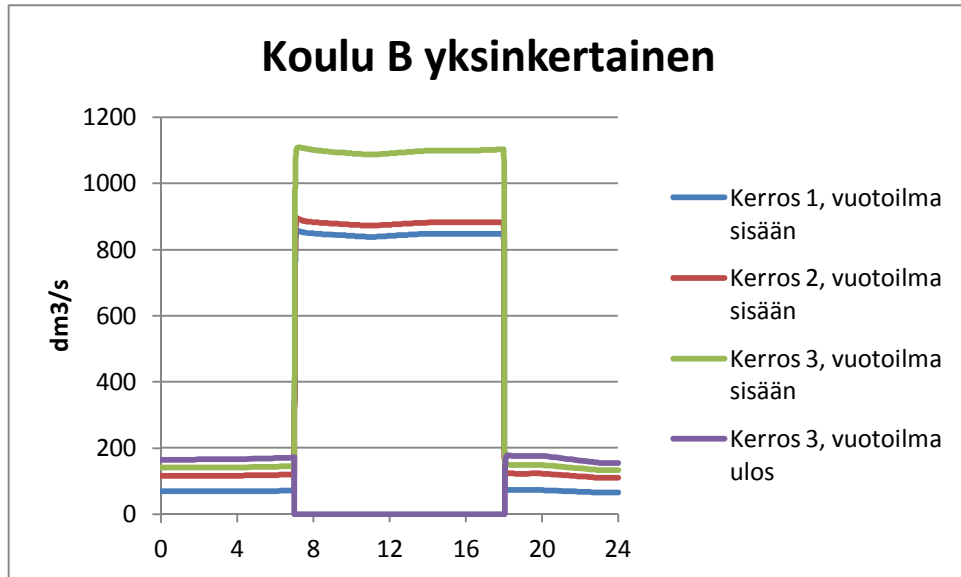
Yksityiskohtainen malli ei kuitenkaan enää aukkojen poistamisen jälkeen vastaa todellista kulutusta, joten ongelma päätettiin ratkaista, kuten koulun A tapauksessakin, lisäämällä yksinkertaiseen simulointimalliin porraskäytäviä kuvaavat aukot kerrosten välille. Koulussa on kolme suurempaa porraskäytävää, joten aukkojen määräksi valittiin kolme/kerros. Yksittäisen aukon koko on sama kuin koulun A tapauksessakin, $0,2 \text{ m}^2$ 4 Pa paine-erolla. Simuloinnissa on käytetty samaa aukkoa kuin vaipan vuotoreittienkin mallintamisessa, tästä syystä aukon koko ilmoitetaan määrätylelle paine-erolle. Kuvaajassa 3.22 on vertailtu koulun B alkuperäistä yksinkertaista simulointimallia ja kerrosten välisillä aukoilla korjattua mallia yksityiskohtaiseen simulointimalliin.



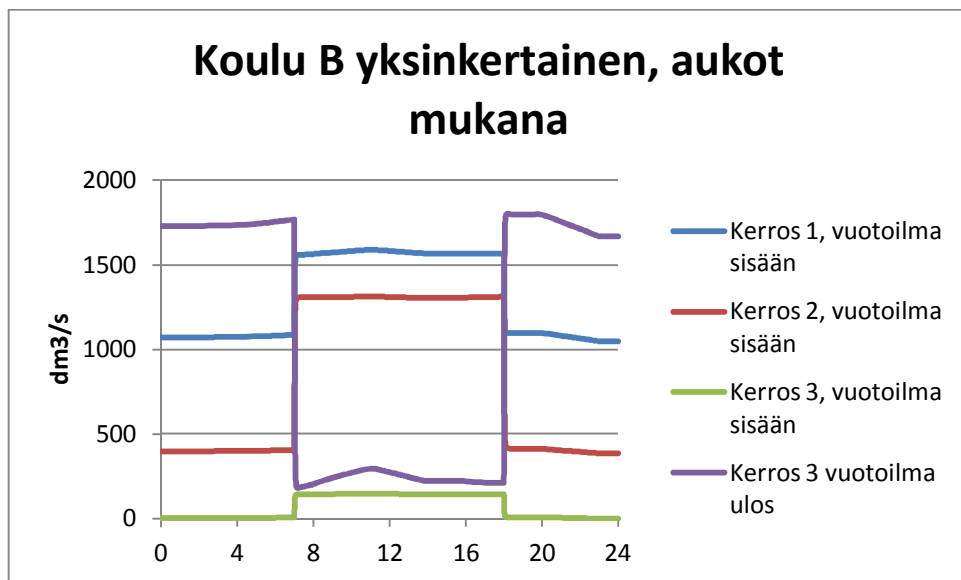
Kuvaaja 3.22. Koulun B yksinkertainen malli kerrosten välisillä aukoilla ja ilman verrattuna yksityiskohtaiseen simulointimalliin.

Kuvaajasta nähdään, että aukkojen lisääminen kasvattaa yksinkertaisen mallin tasetta hyvin lähelle yksityiskohtaista simulointimallia. Suurimmat erot taseista löytyvät vaipan läpi tapahtuvista häviöistä johtuen vaipan laskennallisista kokoeroista, mutta ne ovat suhteessa lämmitysenergiantarpeeseen hyvin pieniä.

Kuvaajissa 3.23 ja 3.24 on esitetty vuotoilmavirrat kerroksittain yksinkertaisille simulointimalleille. Toisessa on mukana kerrosten väliset aukot ja toisessa ei.



Kuvaaja 3.23. Koulun B yksinkertaisen simulointimallin päivittäiset vuotoilmavirrat kun kerrosten välillä ei ole yhteyttä.

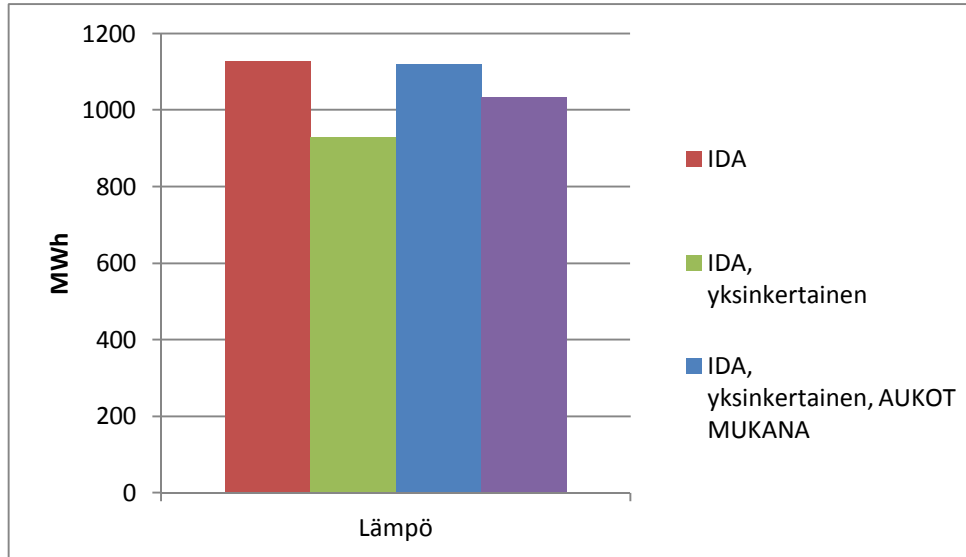


Kuvaaja 3.24. Koulun B yksinkertaisen simulointimallin päivittäiset vuotoilmavirrat kun kerrosten välillä on yhteys.

Kuvaajista nähdään kuten koulun A tapauksessakin, että vuotoilma-aukkojen lisäämisellä on suuri vaikutus rakennuksen vuotoilmavirtoihin. Vaikutus on suuri erityisesti ilmanvaihdon käyttöaikojen ulkopuolella, jolloin terminen paine-ero aiheuttaa voimakkaan ilmavirran ulos rakennuksen ylimmästä kerroksesta. Vuoto on suuruudeltaan noin 15 % koneellisen ilmanvaihdon määrästä. Vuotoilmavirran suuruuteen vaikuttavat mer-

kittävästi koneellisen poistoilmanvaihdon korvausilma-aukot rakennuksen vanhan osan seinissä, jotka pienentävät paine-eroa vaipan yli.

Taulukkoon 3.25 on koottu yhteenvedona eri simulointimallien todelliset lämmitysenergiankulutukset yksinkertaisen simulointimallin korjauksen jälkeen. Energiat ovat ostoenergioita.



Kuvaaja 3.25. Koulun B simulointimallien lämmitysenergiankulutus yksinkertaisen simulointimallin korjauksen jälkeen. Energiat ovat ostoenergiankulutuksia, joissa on mukana lämpimän käyttöveden lämmitys.

Kuvaajasta nähdään, että yksinkertaisen mallin korjauksen jälkeen yksinkertainen ja yksityiskohtainen malli vastaavat lämmitysenergiankin osalta hyvin toisiaan. Rakentamismääräysten mukainen malli ei vastaa hyvin mitattua eikä simuloitua todellista kuluusta, mutta siitä ja alkuperäisestä yksinkertaisesta simulointimallista voidaan energiansäästösimulointien osalta vetää johtopäätöksiä toimenpiteiden aiheuttamien säästöjen herkkyyksistä kuten koulun A tapauksessakin.

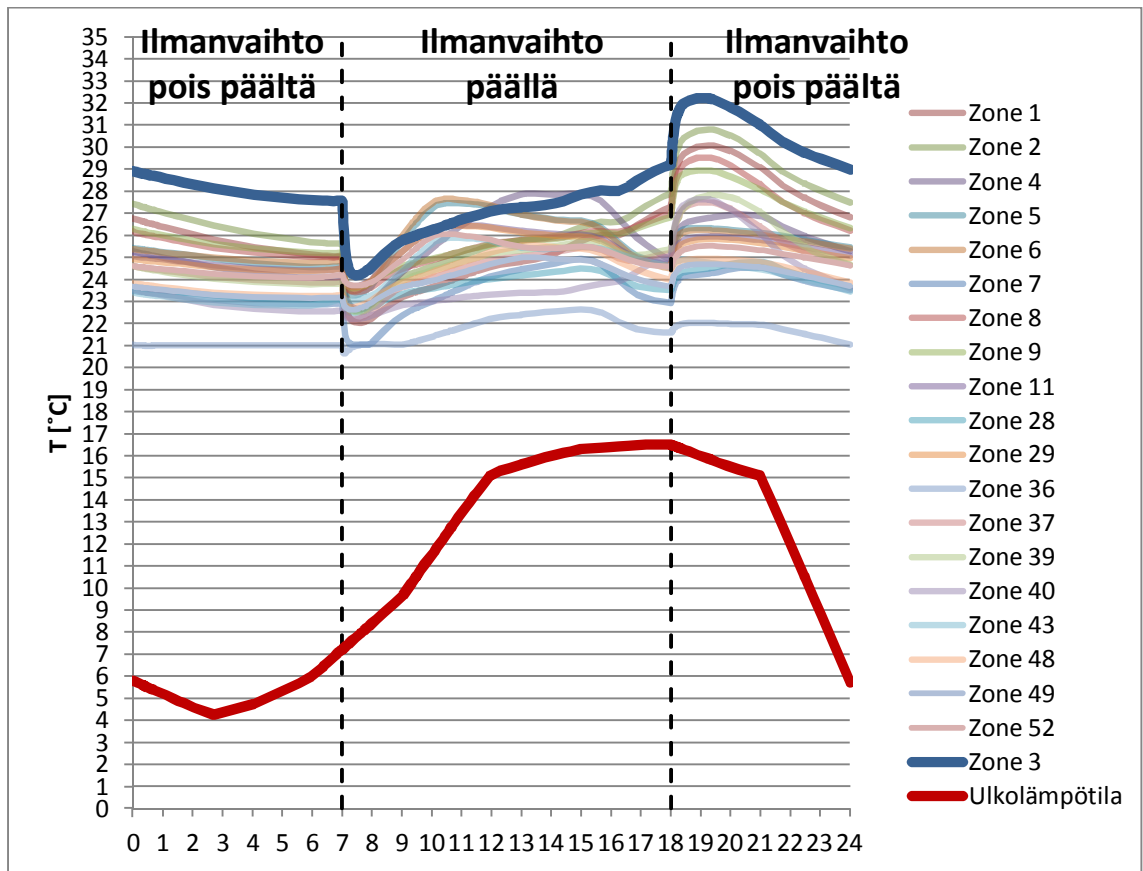
3.7 Lisätarkastelu jäähdytystarpeen mallintamiseen liittyvästä tyyppitilan valinnasta

Uusissa rakentamismääräyksissä (D3, RakMK) on esitetty vaatimuksia rakennusten kesäajan lämpötiloille. Määräyksissä vaaditaan, että asuinrakennuksissa lämpötilaa 27°C ja muissa rakennuksissa (kuten toimisto-, liike-, sairaala- ja opetusrakennuksissa) lämpötilaa 25°C ei saa aikavälillä 1. kesäkuuta ja 31. elokuuta ylittää enempää kuin 150 astetuntia. Haitallisen ylikämmenemisen estämiseen suositellaan määräyksissä ensisijaisesti rakenteellisia ja passiivisia suojauskeinoja sekä yötuuletusta. Mikäli ehdot eivät näillä keinoilla täyty, saattaa tarpeen olla jäähdytysjärjestelmän käyttäminen. Edellä mainitun vaatimuksenmukaisuuden osoittamiseksi edellytetään rakentamismääräyksissä lämpötilalaskennan suorittamista vähintään yhdessä rakennuksen tyyppitilassa. Tyyppitilaksi valitaan lämpökuormiltaan rakennuksen suurin tila, joka vastaa rakennuksen tyyppillisestä käyttötarkoituksesta. Asuinrakennuksissa tällaisia tiloja ovat makuu- ja olohuoneet,

toimistorakennuksissa toimisto-, avotoimistotilat ja neuvotteluhuoneet, sekä opetusrakennuksissa opetustilat. Suurimman lämpökuorman omaavan tilan löytämiseksi opasteaan määräyksissä valitsemaan tila suurimman ikkunapinta-alan tai suurimpien laitekuormien perusteella joko rakennuksen länsi- tai eteläsivulta.

Seuraavassa tarkastellaan lämpötilajakaumia sekä rakentamismääräyksissä valittavaksi edellytetyn tyyppitilan valintaan liittyvää mahdollista vaikeutta molemmissa simuloituista kouluista. Tarkasteluihin käytetään simulointimalleja, joissa huonelämpötilojen asetusarvot ovat tasaiset. Kummassakaan koulussa ei ole käytössä minkäänlaista jäähdytysjärjestelmää, passiivista aurinkosuojausta eikä yötuuletusta käytetä. Koulun A tapauksessa ilmanvaihto sammuu kello 17 ja koulun B tapauksessa kello 18. Säädatana on simuloinneissa käytetty samaa Jyväskylän 1979 säädataa kuin edelläkin. Koulujen pohjapiirustukset vyöhykkeineen on esitetty *liitteissä 5 ja 6*.

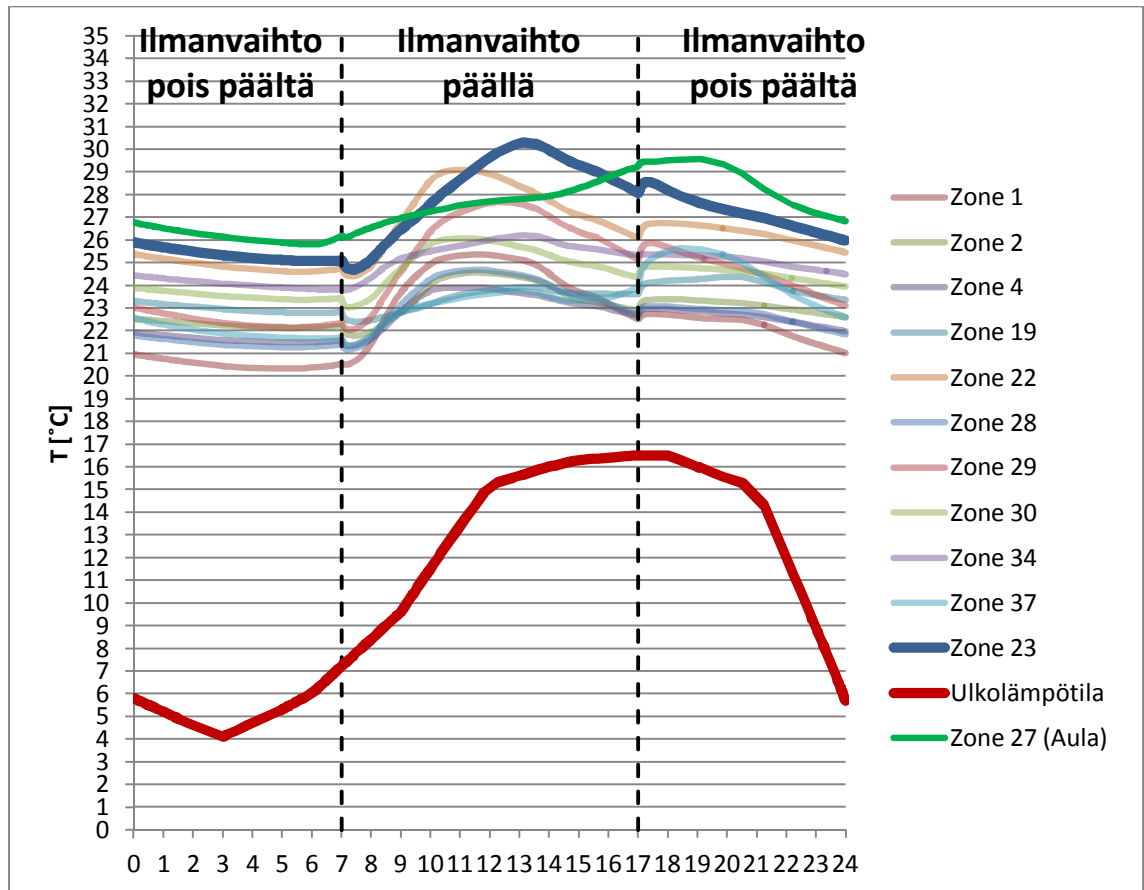
Koulun B tapauksessa tila valittiin koulun länsisivulta, koska sillä oli huomattavasti enemmän ikkunapintaa kuin rikkonaisella eteläseinällä. Lisäksi tila valittiin ylimmästä kerroksesta, keskeltä rakennusta, sillä siellä häviöt seinien kautta ovat pienimmät ja toisaalta edellä esitellyn savupiippuilmion vuoksi pienin vuotoilmavirta sisään rakennukseen ilmastoinnin käyttöaikojen ulkopuolella. Kuvaajassa 3.26 on esitetty lämpötilajakaumat kaikille koulun opetustiloille ja kirjastolle. Tyyppitila on kuvaajassa esitetty tummemmalla sinisellä lihavoidulla viivalla.



Kuvaaja 3.26. Koulun B opetus- ja ruokailutilojen, sekä opettajanhuoneen ja kirjaston lämpötilajakauma toukokuun loppupuolella.

Kuvaajasta nähdään, että tyyppitilan valinta osui hyvin oikeaan. Muutamassa itäsivun luokassa lämpötila näkyy aamulla nousevan korkeammaksi kuin valitussa tyyppitilassa, mutta ainoastaan muutamaksi tunniksi. Kuvaajasta nähdään myös, että koulun huonelämpötilat nousevat erittäin korkeiksi jo kohtuullisen alhaisillakin ulkoilman lämpötiloilla. Tämä johtuu suhteellisen alhaisesta ilmanvaihdon määrästä, suurista sisäisistä kuormista ja siitä, että ilmanvaihto sammuu mallissa yöksi kokonaan. Ilmanvaihdon sammumisen vuoksi on myös havaittavissa selkeä lämpötilan nousu rakennuksen länsisivulla sijaitsevilla luokissa.

Koulun A tapauksessa tyyppitilan valinta on hankalampi, sillä koulun länsisivulla, etenkin eteläreunassa, ei ole opetustiloja, vaan porraskäytävä. Lähes koko koulun länsisivu koostuu käytävistä ja aulatiloista. Lisäksi koulussa on harjakatto ja kylmä ullakotila, joten ylimmän kerroksen tilojen valinta ei ole kannattava. Tästä syystä valittiin tyyppitilaksi luokkatila ensimmäisestä kerroksesta koulun kaakkoisnurkasta. Luokkatilan häviöt seinien läpi ovat pienet, koska ylä- ja alapuolella on lämmitetyt kerrokset ja luokassa on runsaasti ikkunapinta-alaa. Kuvaajassa 3.27 on esitetty lämpötilajakaumat kaikille koulun opetus- ja ruokailutiloille sekä opettajanhuoneelle. Lisäksi kuvaajassa on esitetty koulun länsisivulla sijaitsevan pääaulan lämpötilajakauma. Tyyppitila on kuvaajassa esitetty sinisellä lihavoidulla viivalla.



Kuvaaja 3.27. Koulun A opetus- ja ruokailutilojen sekä opettajanhuoneen lämpötilajakaumat toukokuun loppupuolella.

Kuvaajasta nähdään, että tyyppitilan valinta osui oikeaan. Lämpötila käy tyyppitilaa korkeammalla yhdessä itäsivun luokassa, mutta ainoastaan pikaisesti. Sen sijaan koulun länsisivulla sijaitsevan pääaulan lämpötila on suurimman osan vuorokautta korkeampi kuin tyyppitilaksi valitun luokan. Koulun lämpötilajakaumissa ei myöskään nähdä samanlaista kohoamista ilmanvaihdon sammumisen jälkeen kuin koulun B tapauksessa. Tämä johtuu ikkunoiden vähäisemmästä määrästä ja siitä, ettei luokkatiloja ole sijoitettu koulun länsisivulle. Lämpötilat ovat myös keskimäärin alhaisemmat kuin koulussa B johtuen ikkunoiden määrän lisäksi suhteellisesti suuremmasta ilmanvaihdon määrästä.

Koulujen perusteella voidaan sanoa, että tyyppitilan valitseminen on rakennuksissa yleensä melko helppoa. Rakentamismääräyksissä mainittujen valintakriteerien ikkunapinta-alan ja laitekuormien perusteella valitsemisesta voidaan tässä yhteydessä todeta olevan riittäviä, kunhan muistetaan ottaa huomioon myös yöaikaiset häviöt ja sisäiset ilmavirrat. Lisähuomiona koulujen osalta voidaan tarkastelun perusteella todeta, että koulurakennuksissa hyvä passiivinen keino yllälämpenemisen estämiseksi on olla sijoittamatta opetustiloja koulun länsisivulle.

4 ENERGIAANSÄÄSTÖPOTENTIAALIN SELVITÄMINEN

4.1 Koulun A energiansäästötoimenpiteet

Koulussa A on jo käytössä uudehkot tilakohtaiset ilmanvaihtokoneet joissa on suhteellisen tehokas rekuperatiivinen ristivirtalämmöntalteenotto, joten ilmanvaihdossa ei säästöpotentiaalia juuri ole. Tiiveyskokeissa rakennus todettiin todella tiiviiksi, $n_{50} \approx 2$ 1/h, joten myöskään rakennuksen seiniin ei ole kannattavaa tehdä parannuksia. Rakennuksen yläpohja sen sijaan rajautuu kylmään ullakotilaan, johon on helppo lisätä eristettä. Työssä tarkastellaan eristeen lisäämisen tuomaa energiansäästöä eri simulointimallien avulla. Ikkunoiden osalta työssä tarkastellaan uudempien MSE-ikkunoiden asennuksen energiansäästöpotentiaalia eri mallien avulla. Tarkasteluissa verrataan ostoenergiankulutuksia, eli lämmönkulutuksia, joissa on mukana käyttöveden lämmitys. Laskettaessa energiansäästöä tämä ei kuitenkaan vaikuta tuloksiin, sillä käyttöveden kulutus ei toimenpiteiden välillä vaihtelee. Käytännössä siis erot muodostuvat tilojen lämmitysenergian tarpeen muutoksista.

Koulun A energiansäästötoimenpiteiden vaikutusten vertailu aloitetaan laske-
malla koulun nykytilaa vastaavalle yksityiskohtaiselle simulointimallille energiatehokkuusluku ja määrittämällä energiatehokkuusluokka. Lähtötilanteessa kiinteistösähkönkulutus, johon oletetaan sisältyvän kaiken valaistus- ja ilmanvaihtosähkön on 19 MWh. Kokonaislämmitysenergia on 137 MWh josta noin 5 MWh kuluu käyttöveden lämmitämiseen. Laskemalla simulointiohjelmassa säädätänä käytetyn vuoden 1979 lämmitystarveluku 4998 Kd, ja käyttämällä kaavoja 2.2 sekä 2.3, päädytään kansalliseen ET-luvun vertailuarvoon 143 kWh/brm²/vuosi, joka vastaa energiatehokkuusluokkaa B. Koulun energiatehokkuusluokka normitettuna kansalliseen vertailukohtaan Jyväskylään vastaa siis jo nykyisellään rakentamismääräystasoa. Toki, verrattaessa rakentamismääräystasoon on huomioitava, että koulun keskilämpötila on alle 21°C.

Tämän jälkeen tarkastellaan patteriverkoston perussäädön vaikutusta koulun energiankulutukseen. Johtuen simulointitavasta, erilaisten simulointien tuloksena saatu energiansäästö on luotettavampi, jos rakennuksen lämpötilaprofiili on jo ennen energiansäästötoimenpidettä tasainen. Kuten edellä todettiin, koulun A tilojen keskilämpötilat olivat keskimäärin alle 21°C. Tämä tarkoittaa, että patteriverkoston perussäätö kasvat-
taisi energiankulutusta, mikäli verkosto säädettäisiin toimimaan 21°C:ssa. Simulointimallin mukaan patteriverkoston tasapainotus 21°C:een tuottaisi koululla A noin 8 MWh:n vuotuisen lämmönkulutuksen lisäyksen. Kulutuksen kasvu vastaisi lähes 5,5 % lisäystä lämmönkulutukseen. Tämä tekisi todennäköisesti energiansäästötoimenpiteistä

kannattamattomia. Tämän vuoksi, ja koska huonelämpötiloja ei koululla ole koettu häiritsevästi valitaan patterien tasapainotuslämpötilaksi 20°C, jolloin tasapainotetun mallin vuosienenergiantukutus laskee 1,2 MWh, eli vajaan prosentin tasapainottamattomaan simuloimintimalliin. Tämä ei vielä paranna koulun energiatehokkuusluokkaa. Taulukossa 4.1 on esitetty eri simuloimintimallien pohjalta lasketut energiatehokkuusluvut patteriverkoston perussäädön jälkeen.

Taulukko 4.1. Koulun A energiatehokkuusluku laskettuna eri simuloimintimallien pohjalta patteriverkoston perussäädön jälkeen.

Patteriverkoston säätö	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana			
	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana	IDA, RakMK
Kiinteistösähkön kulutus, MWh	19,16	18,86	18,82	36,35
Lämmitysenergia, MWh	135,98	108,28	128,97	169,48
Käyttövesi, MWh	5,10	5,11	5,11	9,75
ET-luku	141	116	135	188
ET-luokka	B	A	B	C

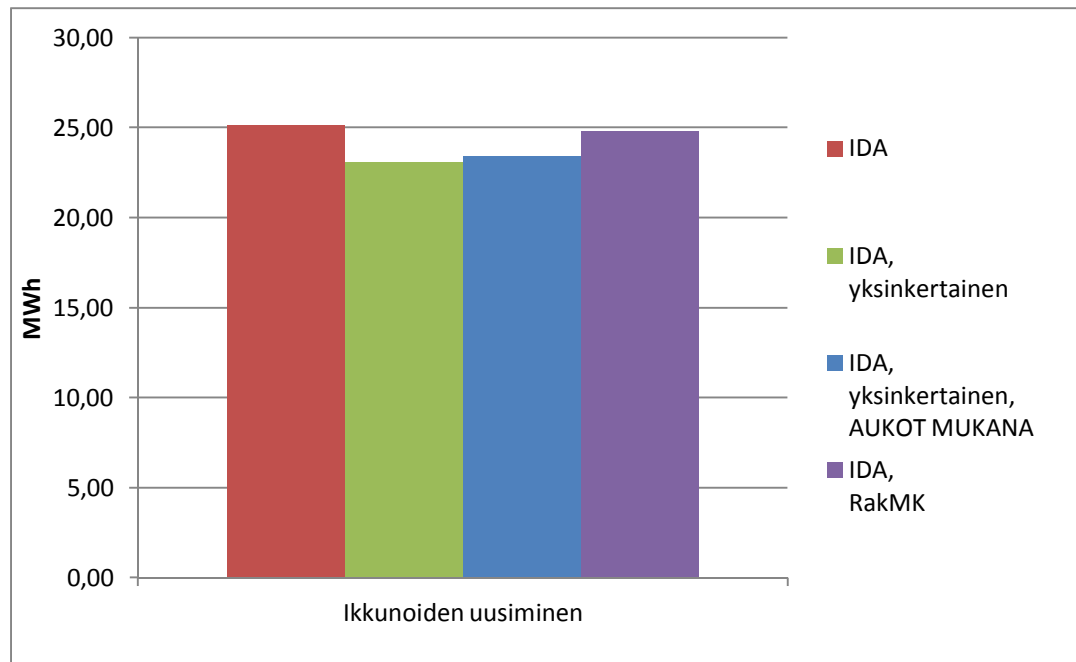
Taulukosta voidaan nähdä, että yksinkertaisen mallin huomattavasti yksityiskohtaista mallia pienempi lämmitysenergiatukutus vääristää energiatehokkuuslukua. Rakentamismääräysten mukaisessa mallissa puolestaan edellä todettu suuri ilmanvaihtomäärä vääristää odotetusti energiatehokkuuslukua. Lähinnä yksityiskohtaisen mallin mukaista lämmitystarpeen vertailulukua on korjattu yksinkertainen malli, joka sekään ei anna kovin hyvää tulosta.

4.1.1 Ikkunoiden uusiminen

Ikkunoiden uusimisella voidaan pienentää koulun A lämmitysenergiatukutusta. Uusimiselle ei ole välttämätöntä tarvetta, sillä ikkunat ovat kohtuullisessa kunnossa. Tarkastelun tarkoituksena onkin havainnollistaa miten kannattavaa vanhojen hyväkuntoisten lasien vaihtaminen uusiin on energiataloudellisesta näkökulmasta.

Koulun vanhat ikkunat ovat perinteisiä jakopuitteilla toteutettuja kaksilasisia ruutuikkunoita. Ikkunoiden U-arvoksi simuloiminnissa on arvioitu 3,1 W/m²K. Uusien lasien puolestaan oletetaan olevan U-arvoltaan 1,0 W/m²K olevia eristysikkunoita. Rakennuksen ilmanpitävyyden ei oleteta ikkunaremontissa muuttuvan.

Yksityiskohtaisen simuloimintimallin mukaan ikkunoiden uusimisella saavutetaan noin 25 MWh:n, eli 18,5 %:n vuotuinen lämmitysenergiatukutus. Kuvaajassa 4.1 on esitetty toimenpiteen energiatukutukset eri simuloimintimallien perusteella.



Kuvaaja 4.1. Ikkunoiden uusimisella (U -arvo $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$) saavutettava vuotuinen energiansäästö koulussa.

Kuvaajasta nähdään, että eri simulointimallien mukaisien energiansäästöjen erot eivät ole kovin suuret. Yksityiskohtaisen ja korjatun yksinkertaisen simulointimallin ero energiansäästöissä on $1,7 \text{ MWh}$ eli noin 7% . Ero vastaa vajaata 2% mallien korjaustoimenpiteiden jälkeisistä kokonaislämpöenergiankulutuksista. Kun verrataan mallien suhteellista energiansäästöä, on korjatun yksinkertaisen mallin säästö, $18,2 \%$, jo todella lähellä yksityiskohtaisen simulointimallin mukaista $18,5 \%$:ia. Alkuperäisen yksinkertaisen simulointimallin mukaan ikkunoiden vaihtamisella saavutettava vuotuinen energiansäästö on $21,3 \%$ ja rakentamismääräysten mukaisen mallin mukaan $14,7 \%$ kokonaislämpöenergiankulutuksesta.

Ikkunoiden uusiminen vaikuttaa energiatehokkuuslukuun siten, että yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan uusi energiatehokkuusluku on $119 \text{ kWh/brm}^2/\text{vuosi}$, joka vastaa juuri ja juuri energiatehokkuusluokkaa A. Taulukossa 4.2 on esitetty eri simulointimallien pohjalta lasketut energiatehokkuusluvut.

Taulukko 4.2. Uusien ikkunoiden vaikutus energiatehokkuuslukuun koulussa A.

Uudet ikkunat	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana			
	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana	IDA, RakMK
Kiinteistösähkön kulutus, MWh	19,10	18,79	18,80	36,01
Lämmitysenergia, MWh	110,83	85,20	105,56	144,35
Käyttövesi, MWh	5,10	5,11	5,11	9,75
ET-luku	119	95	113	165
ET-luokka	A	A	A	C

Taulukosta nähdään, kuten patteriverkon säädön tapauksessakin, että yksinkertainen simulointimalli antaa liian pienen energiatehokkuusluvun ja rakentamismääräysten mukainen malli liian suuren. Edes korjattu yksinkertainen simulointimalli ei anna kovin tarkasti samaa energiatehokkuuslukua kuin yksityiskohtainen simulointimalli. Energiatehokkuusluvun tarkasteleminen muiden kuin yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan vaikuttaakin turhalta virheellisen arvon vuoksi, joten jatkossa tarkastellaan ainoastaan yksityiskohtaisen simulointimallin pohjalta laskettua energiatehokkuuslukua.

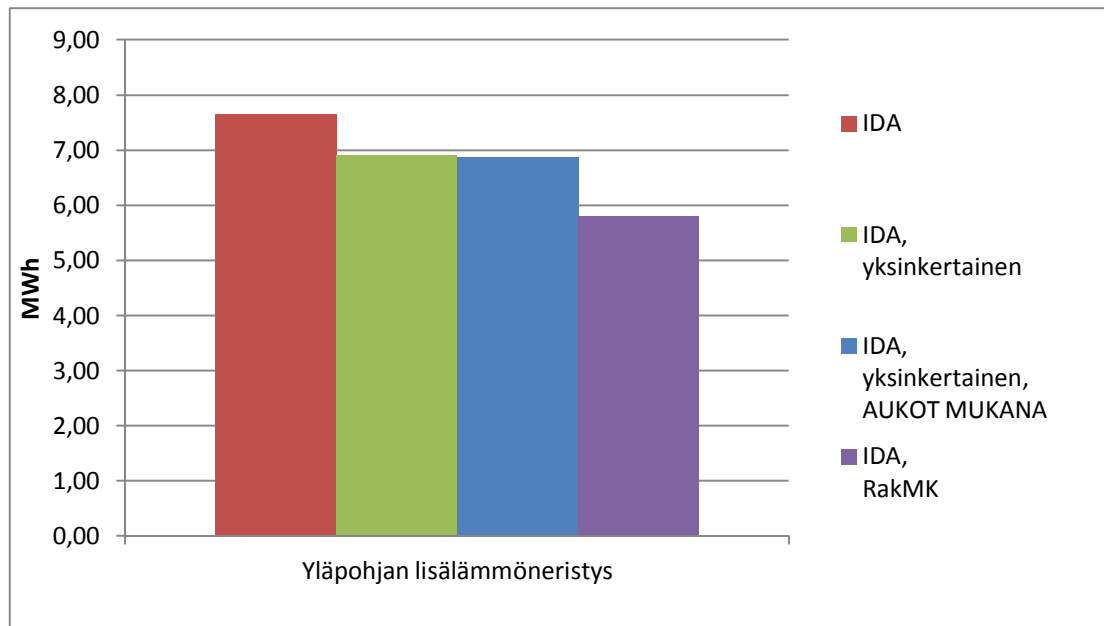
4.1.2 Yläpohjan lisälämmöneristys

Yläpohjan lämmöneristys on toinen mahdollinen toimenpide, jolla voidaan pienentää lämmitysenergian kulutusta. Koulun ullakko on lämmittämätön kylmä tila, jossa sijaitsevat yläkerran luokkien ilmanvaihtokoneet. Ullakko toimii myös varastotilana.

Ullakon lämmöneristäminen voidaan toteuttaa lisäämällä lämmöneristystä ullakon lattiaan, jolloin alapuolella olevien tilojen lämpöhäviöt yläpohjan kautta vähenevät tehokkaasti. Toinen vaihtoehto on asentaa lämmöneristettä kattotuolien väliin aluskatteen alle. Tällöin ullakon lattiaan ja lattialla sijaitseviin ilmastointikoneisiin ei tarvitse tehdä muutoksia. Lisäeristysten seurauksena ullakkotilan lämpötila talvisin nousee, jolloin lämpöhäviöt ullakon ja lämpimien tilojen välisten seinien sekä ovien kautta pienenevät.

Simuloinneissa oletetaan, että lämmöneristys tehdään aluskatteen alle, jolloin ullakon lattiaan ei välttämättä tarvitse tehdä muutoksia. Ullakon käyttö varastotilana on myös miellyttävämpää tasaisemman lämpötilan vuoksi. Lisäeristeen määräksi oletetaan 200 mm mineraalivillaa. Lämpöeristeen asennuksen oletetaan vaativan myös lisäkoolauksia ja muita rakenteellisia toimenpiteitä.

Yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan yläpohjan lisälämmöneristys tuottaa noin 7,6 MWh:n vuotuisen lämmitysenergiesäästön, joka vastaa noin 5,6 %:ia vuotuisesta kulutuksesta.



Kuvaaja 4.2. Yläpohjan lisälämmöneristysten (200mm mineraalivillaa) tuottama vuotuinen lämmitysenergiesäästö koulussa A.

Kuvaajasta 4.2 nähdään, että yläpohjan lisälämmöneristysten tapauksessa erot simulointimallien välillä ovat selvästi suuremmat kuin ikkunoiden vaihdon tapauksessa. Rakentamismääräysten mukaisen mallin ja yksityiskohtaisen simulointimallin ero energiansäästössä on jopa 24 %. Korjatun yksinkertaisen mallin ja yksityiskohtaisen mallin ero on noin 0,8 MWh, joka vastaa 10 % yksityiskohtaisen mallin energiansäästöstä. Ero suhteellisessa energiansäästössä on huomattavasti pienempi: korjatun yksinkertaisen mallin 5,3 % ei ole kovin kaukana yksityiskohtaisen mallin 5,6 %:sta. Rakentamismääräysten mukaisessa mallissa suhteellinen säästö on 3,4 % ja yksinkertaisen simulointimallin 6,4 %.

Toimenpide ei vaikuta yksityiskohtaisen mallin mukaan laskettuun energiatehokkuusluokkaan. Energiatehokkuusluku laskee patteriverkoston säätöön verrattuna noin 7 kWh/brm², jolloin tulokseksi saadaan 134 kWh/brm²/vuosi parhaan energialuokan ylärajan ollessa taulukon 2.4 mukaan 120 kWh/brm²/vuosi.

4.1.3 Toimenpiteiden yhdistäminen

Toimenpiteitä yhdistettäessä on varmistuttava siitä, että toimenpiteiden energiansäästöt eivät vaikuta toisiaan heikentävästi. Tätä tarkasteltiin simuloimalla kaikilla simulointimalleilla tilanne, jossa kouluun suoritetaan molemmat energiansäästötoimenpiteet ja verrattiin mallin antamaa energiansäästöä erillisten simulointimallien antamiin energiansäästöjen summiin.

Taulukko 4.3. Erillisten energiansäästötoimenpiteiden summa verrattuna yhteen, molemmat toimenpiteet sisältävään simulointimalliin.

	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana	IDA, RakMK
Yläpohjan lisälämmöneristys, MWh	7,64	6,90	6,87	5,81
Ikkunoiden uusiminen, MWh	25,15	23,09	23,42	24,80
Σ, MWh	32,79	29,99	30,29	30,61
Molemmat toimenpiteet, MWh	32,85	29,99	30,41	30,69
Ero verrattuna toimenpiteiden summaan (Σ)	0,17 %	0,00 %	0,39 %	0,28 %

Taulukosta 4.3 voidaan nähdä, että erillisten toimenpiteiden summa on kaikissa malleissa hyvin lähellä energiansäästöä, joka saavutetaan mallilla, jossa on tehty molemmat toimenpiteet. Eli voidaan todeta, että toimenpiteet eivät ole tosiaan poissulkevia.

Toimenpiteiden yhdistäminen parantaa odotetusti rakennuksen energialuokkaa parhaaseen A-luokkaan. Yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan laskettuna energiatehokkuusluku on 112 kWh/brm²/vuosi, joka alittaa parhaan energialuokan raja-arvon kirkkaasti.

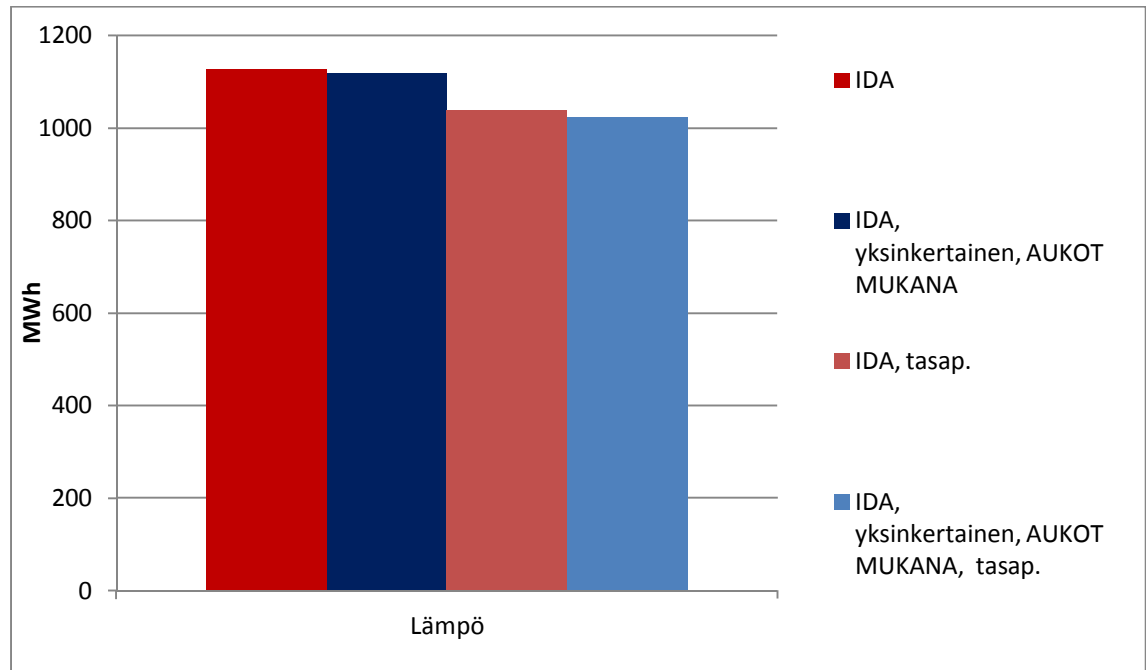
4.2 Koulun B energiansäästötoimenpiteet

Koulun B ilmanvaihdossa ei ole lämmön talteenottoa ja lämpöhäviöt ovat kohtuullisen suuret. Koulun ilmanvaihto koostuu kahdesta osasta: rakennuksen vanhassa osassa on koneellinen poistoilmanvaihto ja uudessa osassa koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Myös rakennuksen ikkunat ovat vanhassa ja uudessa osassa erilaiset. Vanhan osan ikkunat ovat kaksilasiset MS-ikkunat ja uuden puolen kolmilasiset, kaksipuitteiset MSE-ikkunat. Nämä ovat erinomaisia kohteita erilaisille energiansäästötoimenpiteille. Seuraavassa tarkastellaan eri energiansäästötoimenpiteiden vaikutuksia koulun B energiankulutukseen. Tarkastelun lähtökohta on tilanne, jossa patteriverkko on tasapainotettu ja ilmanvaihto täyttää vähintään sisäilmaluokituksen tason S3. Tarkasteluissa verrataan ostoenergiankulutuksia. Lämmönkulutukset sisältävät siis myös käyttöveden lämmityksen. Lämmin käyttövesi ei kuitenkaan vaikuta tuloksiin, sillä sen kulutus ei toimenpiteiden välillä vaihtelee. Käytännössä siis erot muodostuvat tilojen lämmitysenergian tarpeen muutoksista.

Tarkastelujen aluksi tarkastellaan koulun B energiatehokkuuslukua tilanteessa, jossa patteriverkkoa ei ole tasapainotettu. Yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan kiinteistösähkön kulutus, johon lasketaan mallissa kaikki valaistus ja ilmanvaihtosähkö, on noin 170 MWh/vuosi ja lämmitysenergia noin 1127 MWh/vuosi, josta käyttöveden lämmitykseen 67 MWh/vuosi. Kun tiedetään simuloinneissa käytetyn vuoden 1979 lämmitystarveluku 4998 Kd, saadaan kaavojen 2.2 ja 2.3 avulla laskettua koulun B

energiatehokkuusluvaksi 214 kWh/brm²/vuosi. Tämä vastaa energiatehokkuusluokkaa D.

Seuraavaksi arvioidaan karkeasti patteriverkoston perussäädöstä saatavaa energiansäästöä. Arviointi tapahtuu vertaamalla tilojen mitattujen keskilämpötilojen avulla tehtyä simulointimallia malliin, jonka lämmityksen tavoitelämpötila on 21 °C. Kuvaajassa 4.3 on esitetty yksityiskohtaisen ja korjatun yksinkertaisen simulointimallin versiot, joista toiset vastaavat mitattuja lämpötiloja ja toiset mallit tasapainotetun patteriverkoston tapausta.



Kuvaaja 4.3. Koulun B lämmitysenergiankulutukset yksityiskohtaisen ja korjatun yksinkertaisen simulointimallin mukaan esitettynä tilanteissa, joissa patteriverkkoa ei ole tasapainotettu ja on tasapainotettu.

Pelkällä patteriverkoston säädöllä on koululla B yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan mahdollista saada aikaan 89,5 MWh/a:n energiansäästö. Tämä vastaa 7,9 % koulun vuotuisesta kokonaislämmitysenergiankulutuksesta. Korjatun yksinkertaisen simulointimallin mukaan säästö on 94,6 MWh/a, joka vastaa 8,5 % vuotuisesta kokonaislämmitysenergiankulutuksesta, eli korjatun yksinkertaisen mallin tapauksessa patteriverkoston perussäätö tuottaa 0,6 prosenttiyksikköä enemmän säästöä. Suhteellinen ero ei ole merkittävä, mutta absoluuttista 5,1 MWh/a:n eroa voidaan sellaisena pitää. Patteriverkoston säätöjä tekevien yritysten mukaan patteriverkoston säädöllä on taloyhtiöissä saavutettavissa jopa 10-15 % säästö vuotuisessa energiankulutuksessa (*Motiva*).

Taulukossa 4.4 on esitetty eri simulointimallien mukaiset energiatehokkuusluvut ja -luokat koululle B patteriverkoston perussäädön jälkeen.

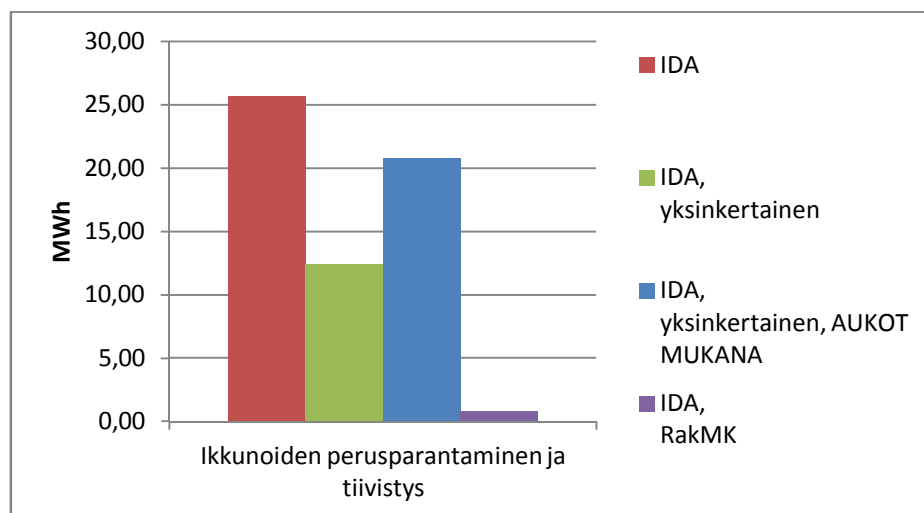
Taulukko 4.4. Koulun B energiatehokkuusluvut ja -luokat eri simulointimallien perusteella.

Patteriverkoston säätö	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana	IDA, RakMK
Kiinteistösähkön kulutus	170,09	170,17	168,82	214,97
Lämmitysenergia	1037,89	883,75	1023,72	1032,37
Käyttövesi	67,30	67,06	67,06	65,74
ET-luku	199	174	197	206
ET-luokka	D	C	C	D

Taulukosta nähdään, että patteriverkoston perussäätö ei yksin riitä laskemaan yksityiskohtaisen simulointimallin perusteella laskettua energiatehokkuusluokkaa. Energiatehokkuusluvuissa on myös suuria eroja johtuen yksinkertaistuksista. Korjattu yksinkertainen simulointimalli antaa kohtuullisen tarkasti saman energiatehokkuusluvun kuin yksityiskohtainen malli. Alkuperäinen yksinkertainen simulointimalli ja rakentamismääräysten mukainen simulointimalli antavat odotetusti virheellisiä arvoja. Suurien erojen vuoksi energiatehokkuusluvun esittäminen kaikkien simulointimallien osalta ei tuo energiansäästötoimenpiteitä tarkasteltaessa mitään lisäarvoa tutkimukselle. Tästä syystä tarkastellaan jatkossa ainoastaan yksityiskohtaisen simulointimallin avulla laskettuja energiatehokkuuslukuja kunkin toimenpiteen yhteydessä.

4.2.1 Ikkunoiden peruskorjaus ja tiivistys

Ikkunoiden osalta oletetaan, että koululla joudutaan joka tapauksessa, ikkunoiden kunnosta riippuen, uusimaan karmien osia, tiivisteitä, lasituksia ja maalaamaan puitteita. Myös tuuletusluukkujen tiivisteet oletetaan vaihdettavan. Toimenpiteen oletetaan parantavan rakennuksen tiivyyttä arvosta $n_{50}=5$ 1/h arvoon $n_{50}=4$ 1/h. Kuvaajassa 4.4 on esitetty erot kokonaislämmönkulutuksessa tilanteessa, jossa rakennuksen ilmanvuotoluku paranee arvoon 4 1/h.

**Kuvaaja 4.4.** Erot simulointimallien kokonaislämmitysenergiassa (ostoenergia) tilanteessa, jossa rakennuksen ilmanvuotoluku paranee arvosta 5 1/h arvoon 4 1/h.

Kuvaajasta nähdään, että parannus ilmanvuotoluvussa aiheuttaa kohtuullisen suuren eron eri simulointimallien energiansäästöissä. Ero yksityiskohtaisen ja korjatun yksinkertaisen simulointimallin välillä on 19 %. Eroa voidaan pitää merkittävänä energiansäästön näkökulmasta. Yksinkertaistetuissa simulointimalleissa rakennuksen vanhassa osassa sijaitsevat korvausilmaventtiilit vaikuttavat enemmän koko kerrokseen kuin yksityiskohtaisessa mallissa, koska malleista puuttuvat huoneiden väliseinät ja virtausta hidastavat oviaukot. Tämän voidaan olettaa vaikuttavan tässä tapauksessa energiansäästöä laskevasti, sillä seinässä olevat vuotoreitteihin ei vaikuta rakennuksen vaipan ilmatii-
vyyden paraneminen. Lisäksi havaitaan, että simulointimalleissa, joissa ei ole kerrosten välistä yhteyttä (alkuperäinen yksinkertainen ja rakentamismääräysten mukainen simulointimalli) säästö rakennuksen vaippaa tiivistämällä on pienempi, koska termisen paine-eron vaikutus häviöihin vaipan läpi on pienempi.

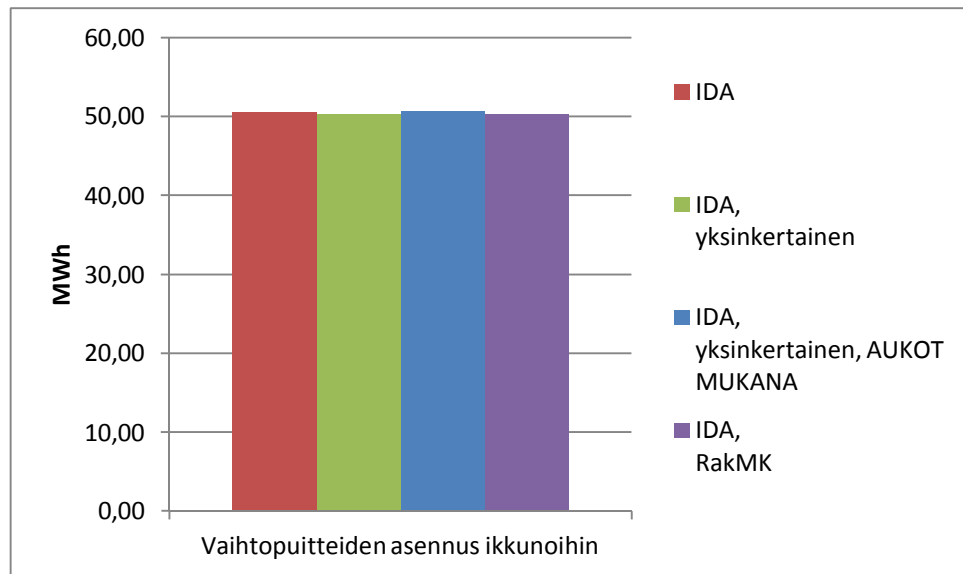
Tulevien vaihtoehtoisten toimenpiteiden osalta käytetään siis tarkasteluissa tätä parempaa ilmanpitävyyttä. Ilmanvuotoluvun paraneminen ei kuitenkaan pienen energiansäästönsä vuoksi, vaikkakin erot mallien välillä ovat suuret, aiheuta juurikaan eroa eri simulointimallien tilojen lämmitysenergian tarpeisiin. Lisäksi oletetaan että koulun vanhalle puolelle asennetaan tuloilmaventtiilit ikkunoiden alle. Tämä vähentää vedon tunnetta, koska patterien takaa johdettava tuloilma ehtii lämmetä hiukan ennen huoneeseen johtamista. Ilman esilämmitystä voitaisiin entisestään parantaa raitisilmapattereiden avulla, mutta niitä ei oleteta hankittavan. Toimenpiteistä koituvat kustannukset otetaan huomioon energiansäästökustannusten kannattavuutta arvioitaessa.

4.2.2 Vaihtopuitteiden asentaminen ikkunoihin

Vaihtopuitteiden asentaminen koulun B ikkunoihin on toimenpide, jolla voitaisiin pienentää lämpöhäviöitä ikkunoiden läpi. Toimenpiteeseen kuuluisi myös vanhojen ikkunapuitteiden korjaustoimenpiteitä ja tiivisteiden vaihtoa. Kyse olisi kuitenkin huomattavasti kevyemmistä korjaustoimenpiteistä kuin tarkastelujen lähtötilanteeseen pääsemiseksi tehtävillä toimenpiteillä, sillä eniten korjausta vaativat ulkopuutteet oletetaan korvattavan kokonaan uusilla alumiinisilla ulkopuutteilla.

Simulointimallissa oletettiin ikkunoiden U-arvojen paranevan vanhan puolen 3,1 W/(m²K):sta ja uuden puolen 2,0 W/(m²K):sta 1,8 W/(m²K):iin, jota pidetään tavallisena arvona kolmilasiselle MSE-ikkunalle (*C4, RakMK*). Vanhalla puolella oletetaan siis asennettavan hieman uutta puolta parempi lasi, joka parantaa ikkunan U-arvoa 1,3 W/(m²K):llä.

Simulointi suoritettiin edellä esitellyllä neljällä eri simulointimallilla. Tulokseksi saatiin yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan noin 5,0 %:n vuotuinen energiansäästö. Kuvaajassa 4.5 on esitetty eri simulointimallien mukaan saatu energiansäästö.



Kuvaaja 4.5. *Vaihto-/lisäpuitteiden asentamisesta saatava vuotuinen energiansäästö koululla B.*

Nähdään, että vuotuisen energiansäästön absoluuttinen määrä on kaikkien mallien mukaan noin 50 MWh. Yksinkertaisen mallin mukaan lisäpuitteiden asennus tuottaisi 5,8 %:n ja rakentamismääräysten mukaisen mallin mukaan 4,9 %:n vuotuisen säästön lämmitysenergiankulutukseen. Korjatun yksinkertaisen simulointimallin mukaan saatava energiansäästö on 5,1 %, joka on hyvin lähellä yksityiskohtaisen mallin mukaista suhteellista energiansäästöä.

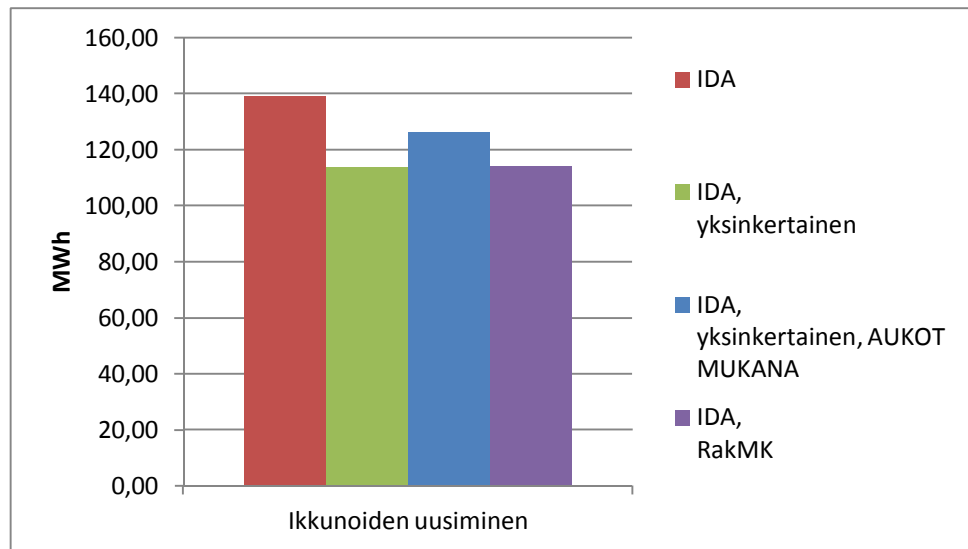
Vaihtopuitteiden asentaminen parantaa koulun B energiatehokkuuslukua yksityiskohtaisen mallin perusteella laskettuna 187 kWh/brm²:een, eli koulun energiatehokkuusluokka paranee arvoon C.

4.2.3 Ikkunoiden uusiminen

Ikkunoiden uusiminen on vaihtoehto, jossa koulun ikkunat poistetaan karmeineen ja vaihdetaan uusiin. Tämä on ainoa mahdollinen toimenpide mikäli ikkunapuitteet ja karmi ovat lahonneet korjauskelvottomaksi. On myös realistista olettaa, että uusien karmien asennuksen yhteydessä rakennuksen ilmanpitävyys paranee apukarmien ilma-
vuotojen paikkaamisen johdosta arvosta $n_{50}=4$ 1/h edelleen $n_{50}=3$ 1/h:iin.

Simulointimalleissa oletetaan, että uudet ikkunat ovat rakentamismääräysten vuoden 2012 luonnoksen vaatimustason mukaisesti 1,0 W/m²K. Tähän päästään esimerkiksi kolmilasisella eristysikkunalla tai MSE-tyyppisellä yhdistelmäikkunalla mikäli lasia pinnoitetaan matalan emissiviteetin omaavilla pinnoitteilla ja käyttämällä erilaisia täytekaasuja. (C4, RakMK)

Yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan investointi tuottaa 13,7 % vuotuisen energiansäästön, joka on suunnilleen puolet enemmän kuin vaihtopuitteivaihtoehdossa. Kuvaajassa 4.6 on esitetty energiansäästö eri simulointimallien mukaan.



Kuvaaja 4.6. *Energiatehokkaiden ikkunoiden asentamisella saatava energiansäästö koulussa B.*

Energiansäästö yksinkertaisen mallin mukaan on 13,0 % ja rakentamismääräysten mukaisen mallin mukaan 11,1 % vuotuisesta energian kulutuksesta. Korjatun yksinkertaisen simulointimallin mukaan suhteellinen energiansäästö ikkunoita vaihtamalla on 12,6 %. Ero absoluuttisessa energiansäästössä korjatun yksinkertaisen ja yksityiskohtaisen mallin välillä on 12,7 MWh, joka vastaa 9,1 %:ia yksityiskohtaisen mallin mukaisesta energiansäästöstä.

Eron korjatun yksinkertaisen ja yksityiskohtaisen simulointimallin välillä voidaan ikkunoiden perusparannusinvestoinnin ja vaihtopuiteinvestoinnin tuloksien perusteella olettaa suureksi osaksi syntyvän oletetusta ilmanvuotoluvun pienenemisestä 4 l/h:sta 3 l/h:iin. Ero energiansäästössä ei ikkunaremontin investoinnin arvoon verrattuna ole kovin merkittävä, mutta vaikuttaa silti investoinnin kannattavuuteen.

Ikkunoiden uusiminen parantaa koulun B energiatehokkuuslukua yksityiskohtaisen mallin perusteella laskettuna arvoon 173 kWh/brm²/vuosi, eli energiatehokkuusluokka paranee patteriverkon perussäädön tilanteesta arvoon C.

4.2.4 Lämmön talteenoton lisääminen olemassa oleviin tuloilmakoneisiin

Ilmanvaihdon osalta kevyempi korjausvaihtoehto on muuttaa olemassa olevia tulo- ja poistoilmanvaihtokoneita siten, että niihin kyetään lisäämään lämmön talteenotto. Yksi mahdollisuus on levylämmönsiirrin, jolloin poistoilmanakanavia on keskitettävä tuloilmakoneen läheisyyteen siten, että ilmapirrret voidaan johtaa lämmönsiirtimeen läpi. Toinen vaihtoehto on vesi-glykolilämmönsiirrin, jolloin tulo- ja poistoilmakoneiden ei tarvitse sijaita lähekkäin vaan lämpö voidaan siirtää koneelta toiselle vesi-glykoliliuoksen avulla.

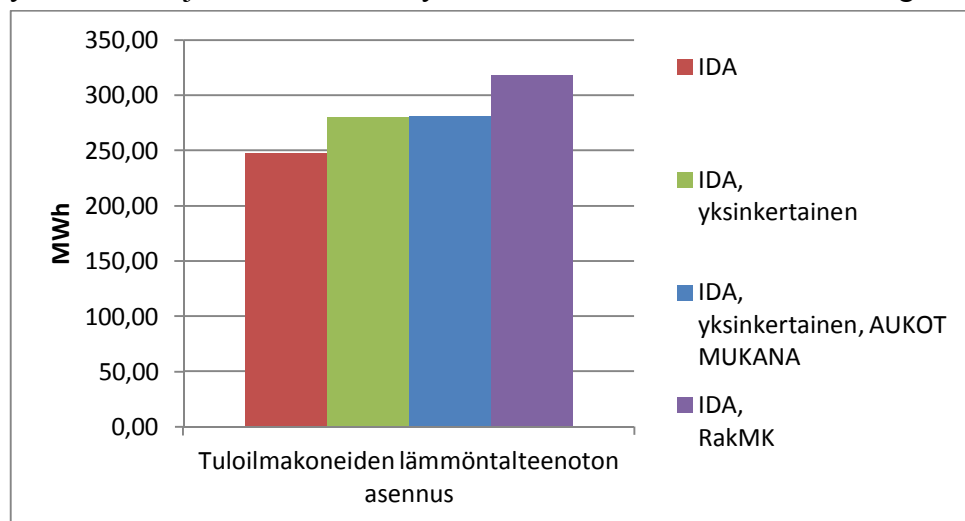
Levylämmönsiirrinvaihtoehdossa oletetaan lämmön talteenoton hyötysuhteeksi 60 %. Lämmönsiirtimeen ei kuitenkaan voida johtaa keittiön ilmavirtoja likaantumisen

vuoksi. 60 % lämmön talteenotto muista kuin keittiön poistoilmavirroista vastaa koulun B tapauksessa noin 55 % lämpötilasuhdetta tuloilmavirrassa.

Vesiglykolilämmönsiirrinvaihtoehdossa puolestaan keittiönkin poistoilmavirrasta voidaan ottaa lämpöä talteen, sillä poistoilman lämmönsiirrin ei ole fyysisessä kosketuksessa tuloilmavirtaan ja sen rakenne on paremmin likaa sietävä. Johtuen eri lämmönsiirtimien etäisyydestä vesi-glykolilämmönsiirron lämmön talteenoton hyötysuhde on yleensä levylämmönsiirrintä alhaisempi. Tästä syystä voidaan olettaa senkin lämpötilasuhteeksi tuloilmavirrassa 55 %.

Simulointi suoritettiin siis lisäämällä simulointimalleihin 55 % tuloilmavirran lämpötilahyötysuhteella toimiva lämmön talteenotto. Muita muutoksia malleihin ei tehty.

Yksityiskohtaisen mallin mukaan toimenpiteellä saadaan noin 247,7 MWh:n vuotuinen energiansäästö. Tämä vastaa suunnilleen 24,5 % vuotuisesta lämmitysenergiankäytöstä. Kuvaajassa 4.7 on esitetty eri simulointimallien mukaiset energiansäästöt.



Kuvaaja 4.7. Tuloilmakoneiden yhteyteen asennettavien lämmön talteenottolaitteiden tuoma vuotuinen energiansäästö koulussa B.

Alkuperäisen yksinkertaisen mallin tapauksessa toimenpiteen tuoma energiansäästö vastasi 32,2 % ja rakentamismääräysten mukaisessa mallissa 30,8 % vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta. Korjatun yksinkertaisen simulointimallin tapauksessa ero yksityiskohtaiseen simulointimalliin oli 32,9 MWh, joka on merkittävä. Tämä muutettuna suhteelliseksi energiansäästökseen antaa arvon 28,0 %, eli eroa yksityiskohtaiseen malliin tulee 3,5 prosenttiyksikköä.

Tuloilmakoneiden lämmön talteenoton lisääminen parantaa koulun B energiatehokkuuslukua yksityiskohtaisen mallin perusteella laskettuna 152 kWh/brm²:een, eli luokkaan C, hyvin lähelle luokan B rajaa.

4.2.5 Ilmanvaihdon täydellinen uusiminen

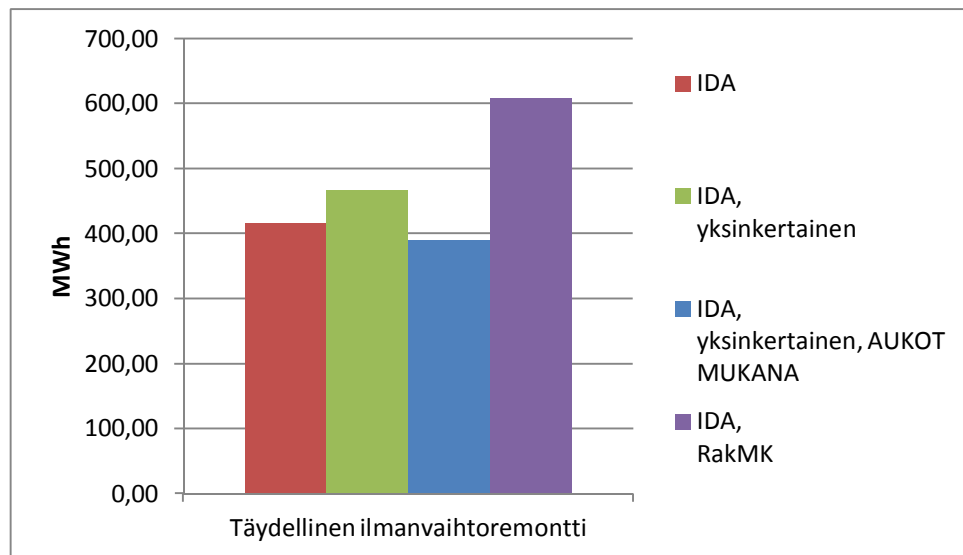
Ilmanvaihdon täydellinen uusiminen tarkoittaa, että koko koulun ilmanvaihto korjataan keskitetyksi tulo- ja poistoilmanvaihdoksi. Remontissa oletetaan käytettävän mahdolli-

simman paljon hyödyksi vanhan ilmanvaihtojärjestelmän rakennetta, mutta kanava-asennuksia joudutaan uusimaan joka tapauksessa vähintään vanhalla puolella, johon joudutaan rakentamaan kokonaan uudet tuloilmakanavat.

Lämmön talteenotoksi oletetaan valittavan pyörivä lämmönsiirrin, jonka lämmön talteenottohyötysuhde on 80 %. Johtuen lämmönsiirtimen rakenteesta, tulo- ja poistoilmavirratt pääsevät laitteessa sekoittumaan. Tästä syystä lämmönsiirtimeen ei voida johtaa esimerkiksi keittiön, WC-tilojen tai metalli- ja puutyötilojen ilmavirtoja. 80 % lämmön talteenotto muista poistoilmavirroista vastaa suunnilleen 70 % lämpötilasuhdetta tuloilmavirrassa, jota käytetään simulointimallin lämmön talteenottoprosenttina (ilmoitetaan IDA-ICE-ohjelmistossa lämpötilasuhteena tuloilmavirrasta).

Tuloilmakoneen asentaminen vanhalle puolelle tarkoittaa sitä, että saatava energiansäästö on huomattavasti edellistä toimenpidettä suurempi. Koska tuloilma ei tule vanhalle puolelle enää suoraan vaipan läpi, vaan se tuodaan tiloihin lämmön talteenoton kautta, saadaan suurempi osa rakennuksen poistoilmavirtojen lämmöstä talteen. Eroa lisää myös tehokkaampi lämmön talteenottoratkaisu. Toimenpiteen kääntöpuolena on lisääntyvä puhallinsähkön tarve – tämä huomioidaan kustannustarkasteluissa. Toisaalta, myös vanhalla puolella tarpeettomaksi käyvien korvausilmaventtiilien perusinvestointikustannus otetaan kustannustarkasteluissa huomioon.

Yksityiskohtaisen mallin mukaan täydellisellä ilmanvaihdon uusimisella olisi mahdollista saada noin 41,0 % säästö vuotuiseen energiankulutukseen. Tämä vastaisi noin 415,3 MWh:n säästöä lämmitysenergiassa. Kuvaajassa 4.8 on esitetty eri simulointimallien mukaiset energiansäästöt investoinnille.



Kuvaaja 4.8. Täydellisen ilmanvaihtoremontin tuoma vuotuinen energiansäästö koulussa B.

Yksinkertaisen simulointimallin mukaan toimenpiteellä voidaan saada aikaan 53,6 % ja rakentamismääräysten mukaisen mallin mukaan jopa 58,8 % vuotuinen energiansäästö. Korjattu yksinkertainen simulointimalli antaa kohtuullisen huonon arvion suhteellisesta energiansäästöstä, 38,8 %, joskin säästön suuruudesta johtuen absoluuttinen ero on 26,0

MWh. Eroa yksityiskohtaiseen simulointimalliin suhteellisessa säästössä tulee 2,2 prosenttiyksikköä.

Kuten edellisenkin ilmanvaihtoinvestoinnin tapauksessa, ero simulointimallien välillä on melko merkittävä. Tästä voidaan päätellä, että on melko vaikeaa määritellä tarkasti yksinkertaisen simulointimallin ilmapirrat siten, että ne kaikkine yksinkertaisuuksineen vastaisivat mahdollisimman tarkasti yksityiskohtaista simulointimallia (/todellisuutta). Kyse on kuitenkin suurista investoinneista, joten karkeakin energiansäästöarvio on hyödyllinen investoinnin kannattavuutta arvioitaessa.

Ilmanvaihdon uusimisella energiatehokkuusluku paranee yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan arvoon 125 kWh/brm²/vuosi, mikäli lasketaan yksityiskohtaisen simulointimallin perusteella. Tämä riittää parantamaan koulun energiatehokkuusluokkaa arvoon B.

4.2.6 Toimenpiteiden yhdistäminen

Koulun B tapauksessa toimenpiteet ovat keskenään vaihtoehtoisia. Voidaan valita joko lisäpuitteiden asennus ikkunoihin tai ikkunoiden täydellinen uusiminen, sekä ilmanvaihdon osalta joko osittainen tai täydellinen uusiminen. Seuraavassa käydään läpi kaikkien neljän vaihtoehtoisen toimenpideyhdistelmän osalta se, miten hyvin kahden erillisen investoinnin energiansäästöjen summat kuvaavat tilannetta jossa simuloidaan molemmat investoinnit tehtäväksi yhtä aikaa.

Tarkasteltaessa tilannetta, jossa koululle asennetaan ikkunoihin vaihtopuutteet ja asennetaan lämmön talteenotto tuloilmakoneiden yhteyteen, voidaan todeta, että erillisten investointien energiansäästöjen summa kuvaa hyvin tilannetta, jossa toteutetaan molemmat energiansäästöinvestoinnit. Taulukossa 4.5 on verrattu erillisten toimenpiteiden eroa tilanteeseen, jossa tehdään molemmat toimenpiteet.

Taulukko 4.5. Investointien yhdistämisestä saatavan energiansäästön vertailu vaihtopuutteiden ja tuloilmakoneiden lämmön talteenoton asentamisen osalta koulussa B.

Säästö	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana	IDA, RakMK
Vaihtopuutteiden asennus, MWh	50,50	50,32	50,72	50,30
Tuloilmakoneiden lämmön- teenoton asennus, MWh	247,69	280,31	280,59	317,87
Σ, MWh	298,19	330,62	331,31	368,17
Toimenpiteet yhdessä, MWh	298,42	330,89	331,52	368,29
Ero verrattuna toimenpiteiden sum- maan (Σ)	0,08 %	0,08 %	0,06 %	0,03 %

Taulukosta nähdään, että erillisten investointien yhdistäminen vastaa hyvin tilannetta, jossa toimenpiteet tehdään yhdessä. Kyseisten toimenpiteiden summalle saadaan energiatehokkuusluku 146 kWh/brm²/vuosi, joka vastaa energiatehokkuusluokkaa B.

Mikäli vaihtopuitteiden asentamisen yhteydessä päädyttäisiinkin uusimaan koko ilmanvaihtojärjestelmä, päädytään energiatehokkuudeltaan 120 kWh/brm²/vuosi kulu-
tukseen, joka vastaa luokkaa B. Taulukossa 4.6 on verrattu erillisten toimenpiteiden summaa tilanteeseen jossa molemmat toimenpiteet tehdään kerralla.

Taulukko 4.6. Investointien yhdistämisestä saatavan energiansäästön vertailu vaihtopuitteiden asentamisen ja ilmanvaihdon täydellisen uusimisen osalta koulussa B.

Säästö	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana	IDA, RakMK
Vaihtopuitteiden asennus, MWh	50,50	50,32	50,72	50,30
Täydellinen ilmanvaihtoremontti, MWh	415,30	467,20	389,24	607,24
Σ, MWh	465,80	517,52	439,96	657,54
Toimenpiteet yhdessä, MWh	465,17	515,24	438,69	655,06
Ero verrattuna toimenpiteiden summaan (Σ)	-0,13 %	-0,44 %	-0,29 %	-0,38 %

Taulukosta voidaan nähdä, että erillisten toimenpiteiden summa vastaa melko hyvin yhdistettyjen toimenpiteiden mallia.

Taulukoissa 4.7 ja 4.8 on esitetty vertailut tilanteille, mikäli päädytään vaihtopuitteiden sijaan asentamaan kokonaan uudet ikkunat.

Taulukko 4.7. Investointien yhdistämisellä saatavan energiansäästön vertailu ikkunoiden uusimisen ja tuloilmakoneiden asentamisen osalta koulussa B.

Säästö	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana	IDA, RakMK
Ikkunoiden uusiminen, MWh	139,02	113,63	126,35	114,15
Tuloilmakoneiden lämmöntalteenoton asennus, MWh	247,69	280,31	280,59	317,87
Σ, MWh	386,71	393,94	406,94	432,02
Toimenpiteet yhdessä, MWh	387,53	394,35	407,16	432,33
Ero verrattuna toimenpiteiden summaan (Σ)	0,21 %	0,10 %	0,06 %	0,07 %

Taulukko 4.8. Investointien yhdistämisellä saatavan energiansäästön vertailu ikkunoiden ja ilmanvaihdon täydellisen uusimisen osalta.

Säästö	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, Aukot mukana	IDA, RakMK
Ikkunoiden uusiminen, MWh	139,02	113,63	126,35	114,15
Täydellinen ilmanvaihtoremontti, MWh	415,30	467,20	389,24	607,24
Σ, MWh	554,32	580,84	515,59	721,39
Toimenpiteet yhdessä, MWh	550,23	572,57	529,15	711,86
Ero verrattuna toimenpiteiden summaan (Σ)	-0,74 %	-1,42 %	2,63 %	-1,32 %

Taulukoista nähdään, että myös kyseisten toimenpiteiden yhdistämisen osalta erillisten toimenpiteiden summa vastaa hyvin mallia, jossa molemmat investoinnit tehdään yhtä aikaa. Taulukkojen 4.6 ja 4.8 perusteella Ilmanvaihdon täydellisestä uusimisesta näyttäisi aiheuttavan pientä epätarkkuutta tuloksissa.

Ikkunoiden uusiminen, yhdessä tuloilmakoneiden lämmön talteenoton asentamisen kanssa, parantaa energiatehokkuuslukua arvoon 132 kWh/brm²/vuosi, joka vastaa energiatehokkuusluokkaa B. Mikäli päätetään uusia koko ilmanvaihto, parantaa se, yhdessä ikkunoiden uusimisen kanssa, energiatehokkuuslukua arvoon 106 kWh/brm²/vuosi, joka puolestaan vastaa parasta energiatehokkuudeltaan parasta A-luokkaa. Ero johtuu, kuten edellä mainittiin, siitä että toisessa ilmanvaihdon täydellisen uusimisen tapauksessa poistoilmavirrasta saadaan suurempi osa lämpöä talteen.

4.3 Yhteenveto ja johtopäätökset koulujen energiansäästötoimenpiteistä ja simulointimalleista

Taulukkoihin 4.9 ja 4.10 on koottu yhteen eri investointien säästöpotentiaalit molemmille kouluille.

Taulukko 4.9. Yhteenveto koulun A investointien energiansäästöpotentiaaleista (MWh).

Koulu A	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, AUKOT MUKANA	IDA, RakMK
Perusinvestoinnit, MWh				
Patteriverkoston perussäätö	1,2	2,7	1,9	
Energiansäästö-investoinnit, MWh				
Ikkunoiden uusiminen	25,2	23,1	23,4	24,8
Yläpohjan lisäeristys	7,6	6,9	6,9	5,8

Taulukko 4.10. Yhteenveto koulun B investointien energiansäästöpotentiaaleista (MWh).

Koulu B	IDA, yksinkertainen, AUKOT MUKANA			
	IDA	IDA, yksinkertainen	IDA, yksinkertainen, AUKOT MUKANA	IDA, RakMK
Perusinvestoinnit, MWh				
Patteriverkoston perussäätö	89,5	81,2	94,6	
Ikkunoiden tiivistys	25,7	12,5	20,8	0,9
Energiansäästöinvestoinnit, MWh				
Vaihtopuitteet	50,5	50,3	50,7	50,3
Uudet ikkunat	139,0	113,6	126,3	114,2
Lämmön talteenotto tuloilmakoneisiin	247,7	280,3	280,6	317,9
Ilmanvaihdon täydellinen uusiminen	415,3	467,2	389,2	607,2

Taulukkoihin on koottu yksittäisten investointien tuomat säästöt. Investointien säästöt on laskettu siten, että varsinaisten energiansäästöinvestointien lisäksi suoritetaan aina perusinvestoinnit. Tarkasteluissa todettiin myös, että eri rakennuksen osiin (esimerkiksi ikkunoihin ja ilmanvaihtoon) kohdistuvia energiansäästöinvestointeja on mahdollista yhdistellä keskenään ja investointien kokonaisenergiansäästöt saadaan silti melko tarkasti laskemalla erillisten investointien säästöt yhteen.

Tehtyjen energiansäästötoimenpiteiden perusteella voidaan sanoa, että tarkastelluista malleista tarkimmin yksityiskohtaista simulointimallia vastasi korjattu yksinkertainen simulointimalli. Rakentamismääräysten mukainen malli antoi lähes kaikissa tarkasteluissa tapauksissa kauimpana yksityiskohtaisen simulointimallin mukaisesta säästöstä olevan tuloksen. Korjattu yksinkertainen simulointimalli antoi myös suurimmassa osassa tutkituista toimenpiteistä paremman tuloksen kuin alkuperäinen yksinkertainen simulointimalli. Sekään ei kuitenkaan antanut kovin luotettavia tuloksia kaikista energiansäästöistä.

Koulun A tapauksessa etenkin yläpohjan lämmöneristyksen tapauksessa korjatun yksinkertaisen mallin antamat tulokset eivät olleet riittävän tarkkoja ollakseen vaikuttamatta investoinnin kannattavuuteen. Mikäli korjatun yksinkertaisen simulointimallin ja yksityiskohtaisen simulointimallin erot tilojen lämmitysenergiankulutuksessa olisivat olleet vähemmän kuin kappaleessa 3.6 mainittu 6 %, olisivat energiansäästötoimenpiteet olleet huomattavasti lähempänä toisiaan, kuten suhteellisten energiansäästöjen osalta tarkasteluissa todettiin. Ongelma tältä osin on siis vältettävissä laskemalla kustannustarkasteluissa yksinkertaisen simulointimallin suhteellisen säästön avulla todellinen säästö mitatuista todellisista lämmönkulutuksista.

Koulun B tapauksessa havaittiin, että mikäli toimenpide vaikuttaa rakennuksen ilmanvuotolukuun, ei korjattukaan yksinkertainen malli vastaa yksityiskohtaisen simu-

lointimallin antamia tuloksia kovin tarkasti. Tämä johtuu lähinnä kerroksissa sijaitsevien väliseinien ja ovien virtausta hidastavan vaikutuksen puutteesta. Tutkimuksessa tulitiin siihen johtopäätökseen, että muuttamalla kerrosten välisien aukkojen kokoa ei ongelmaa voida poistaa, sillä myös alkuperäinen yksinkertaisen simulointimallin kanssa oli samoja ongelmia ilmanvuotoluvun suhteen. Myös ero ilmanvaihtoremonteissa oli merkittävä, joskin noin 3 prosenttiyksikön eroa 24,5 %:n ja 41,0 %:n energiansäästöt aikaansaavissa investoinneissa voidaan vielä pitää kohtuullisena pohjana karkean kustannusarvion tekemiselle.

Kaiken kaikkiaan simulointimalleista voi todeta sen, että paras tapa arvioida investointien energiansäästöjä on rakentaa työn mukaista yksinkertaista korjattua simulointimallia vastaava simulointimalli. Kerrosten välisten aukkojen määrittämisen suhteen päädyttiin työssä tarkasteltujen kahden koulun pohjalta siihen, että 4 Pa paine-erolla 0,2m²:n kokoinen aukko kuvaa parhaiten kouluissa tyypillistä pariovilla kerroksista erotettua porraskäytävää, jossa on säännöllistä kulkua. Mikäli aukko oli pienempi, ei terminen paine-ero päässyt kehittymään tarpeeksi suureksi, ja mikäli se oli suurempi, oli vaikutus liian suuri. Simulointimalli ei kuitenkaan sovellu erityisen hyvin toimenpiteisiin, joissa vaipan ilmanvuotoluku muuttuu radikaalisti. Luotettavin tapa hyödyntää simulointimallia kustannusten arviointiin silloin kun se ei tarkasti vastaa mitattua todellista kulutusta on selvittää sen avulla suhteellinen energiansäästö, jonka avulla voidaan todellisista vuosikulutuksista selvittää potentiaalinen todellinen energiansäästö. Suurten toimenpiteiden, kuten ilmanvaihdon radikaalin muutoksen aiheuttaman energiansäästön arvioinnissa mallin voidaan olettaa riippuvan voimakkaasti koulun rakenteesta ja muutoksen luonteesta.

5 ENERGIATEHOKKUUDEN PARANNUSINVESTOINTIEN KANNATTAVUUS

5.1 Sisäisen korkokannan menetelmä

Tarkasteltujen koulujen energiansäästöinvestointien kannattavuutta tarkastellaan sisäisen koron menetelmällä. Tämä tarkoittaa, että energiansäästötoimenpiteen avulla saavutettua vuosittaista energiankulutuksen kustannussäästöä verrataan energiansäästöinvestoinnin kustannuksiin tuomalla investoinnin pitoajan vuotuiset kustannussäästöt investointihetkeen.

5.1.1 Sisäinen korko ja diskonttaus

Energiansäästöistä koituvat kustannussäästöt voidaan tuoda investointihetkeen diskonttaamalla. Yksittäisen summan diskonttaaminen tapahtuu kaavalla

$$K_n = \frac{1}{(i + 1)^n} * A \quad (5.1)$$

missä i on laskentakorko, n diskontattavien vuosien lukumäärä, K_n diskontatun summan arvo halutulla tarkasteluhetkellä (esimerkiksi investoinnin suoritusajankohta) ja A diskontattava summa. Mikäli diskontattavia summia, A , on vuosittain, kuten vuotuisten energian kustannussäästöjen tapauksessa, voidaan säästöjen arvo tarkasteluhetkellä esittää muodossa

$$K = \frac{1}{(1 + i)} * A + \frac{1}{(i + 1)^2} * A + \dots + \frac{1}{(i + 1)^{n-1}} * A + \frac{1}{(i + 1)^n} * A \quad (5.2)$$

Tämä geometrisen sarjan summa pelkistyy muotoon

$$K = \frac{(1 + i)^n - 1}{(i + 1)^n * i} * A = d_i^n * A \quad (5.3)$$

missä d_i^n on nimeltään *jaksollisten suoritusten diskonttaustekijä*. Diskonttaustekijän, d_i^n , käänteisarvo

$$a_i^n = \frac{1}{d_i^n} \quad (5.4)$$

on *annuiteettitekijä*. Sen avulla voidaan investointi jakaa samansuuruisiksi eriksi kullekin investoinnin pitoajan vuodelle, n .

Sisäinen korko puolestaan on se korkokanta, jonka avulla laskettuna investoinnin vuosittaisten tuottojen ja kustannusten yhteenlaskettu arvo määrättyllä tarkasteluhetkellä on nolla. Mikäli siis investoinnin, I_0 , aiheuttama vuotuinen kustannussäästö energiassa olisi s , voitaisiin annuiteettitekijän avulla kirjoittaa

$$s = a_{i_s} * I_0 \quad (5.5)$$

missä i_s olisi sisäinen korkokanta. Tarkastelussa tehdään oletus, että investoinnin jäänösarvo n vuoden jälkeen on nolla. Tämä voidaan kuitenkin tehdä, mikäli tarkasteluväliksi valitaan investoinnin pitoaika. (Abel, 2010; Aalto, 1983)

5.1.2 Käytettävät korkokannat

Tarkasteltavan menetelmän periaatteena on verrata investoinnin ja siitä saatavien vuotuisten säästöjen sisäistä korkokantaa siihen laskentakorkokantaan, joka kuvaa investoinnin tuotto-odotuksia. Tätä kuvaavana korkokantana voidaan käyttää korkokantaa, joka sisältää inflaation, eli niin sanottua *nimelliskorkokantaa* tai korkokantaa, josta inflaation vaikutus on poistettu – niin sanottua *reaalikorkokantaa*. Näistä reaalikorkokannan käyttäminen on yksinkertaisempaa.

Energian hinnan kehitys vaikuttaa siihen, että vakiona pysyvien energiansäästöjen kustannussäästöt kasvavat tarkastelujakson aikana. Mikäli käytetään reaalikorkoa, olennaista on kasvaako energian hinta yleistä inflaatiota nopeammin. Keskimäärin näin on ollut, joten se on hyvä ottaa huomioon tarkasteluissa. Vuotuinen energian hinnannousu voidaan ottaa huomioon lisäämällä kaavaan 5.2 sitä kuvaava termi e

$$K = \frac{1+e}{(1+i)} * A + \frac{(1+e)^2}{(1+i)^2} * A + \dots + \frac{(1+e)^n}{(1+i)^n} * A \quad (5.6)$$

geometrisen sarjan summa pelkistämällä saadaan

$$d_{i,e}^n = \frac{\left(\frac{1+i}{1+e}\right)^n - 1}{\left(\frac{1+i}{1+e}\right)^n * \left(\frac{1+e}{1+i} - 1\right)} \quad (5.7)$$

Laskennallisesti helpompi tapa on kuitenkin laskea uusi muunnettu korkokanta, jossa energian hinnannousu on otettu huomioon ja sijoittaa se kaavaan 5.3. Uuden korkokannan laskeminen tapahtuu seuraavasti

$$(1+i') = \frac{1+i}{1+e} \rightarrow i' = \frac{1+i}{1+e} - 1 \quad (5.8)$$

missä i' on uusi korkokanta, e energian hinnannousu ja i laskentakorkokanta. Helpoin tapa on yksinkertaistaa tilannetta edelleen vähentämällä energian hinnannousu suoraan laskentakorkokannasta

$$i' = 1 - e \quad (5.9)$$

Tämä voidaan tehdä, mikäli käytetty laskentakorkokanta ja energianhintakehitysprosentti ovat riittävän pieniä. Risto Aallon (1983 s.10) mukaan vähennyslaskun vuoksi tehty virhe on pienempi kuin yksi laskentaprosenttiyksikkö kun $e^*i' < 0,01$. (Abel, 2010; Aalto, 1983; Kurvinen, 2011)

Laskennassa käytettävä korkokanta riippuu investointeihin rahoitukseen käytettävästä pääomasta (omaa vai vierasta) ja investointien riskeistä. Valtionkonttorin Valtion talous- ja henkilöstöhallinnon käsikirjassa (www.valtionkonttori.fi/kasikirja) annetaan ohjeita muun muassa investointien korkoihin liittyen. Vuoden 2011 nimelliseksi korkokustannukseksi ohjeistetaan käsikirjassa 1,8 % (VK 47/03/2011). Reaalikorko on suunnilleen inflaation verran tätä pienempi. Tässä työssä käytetään kuitenkin huomattavasti korkeampia reaalikorkoja investointien pitkästä takaisinmaksuajasta ja suhteellisen synkistä kansainvälisistä talousnäkymistä johtuen. Talousnäkymien synkkyys voi vaikuttaa rahoituksen saantiin ja sitä kautta korkokustannuksiin. Koulun A tapauksessa reaalisen tuottovaatimuksena käytetään 5 %, sillä investoinnin riskit ovat investointien yksinkertaisuuden vuoksi melko pienet. Koulun B tapauksessa sen sijaan investointien kustannuksiin liittyy suurempaa epävarmuutta, joten investointien reaalisen tuottovaatimuksena käytetään 7 %. (Kankaanpää, 2010)

5.1.3 Käyttöiän ja uusintainvestointien merkitys

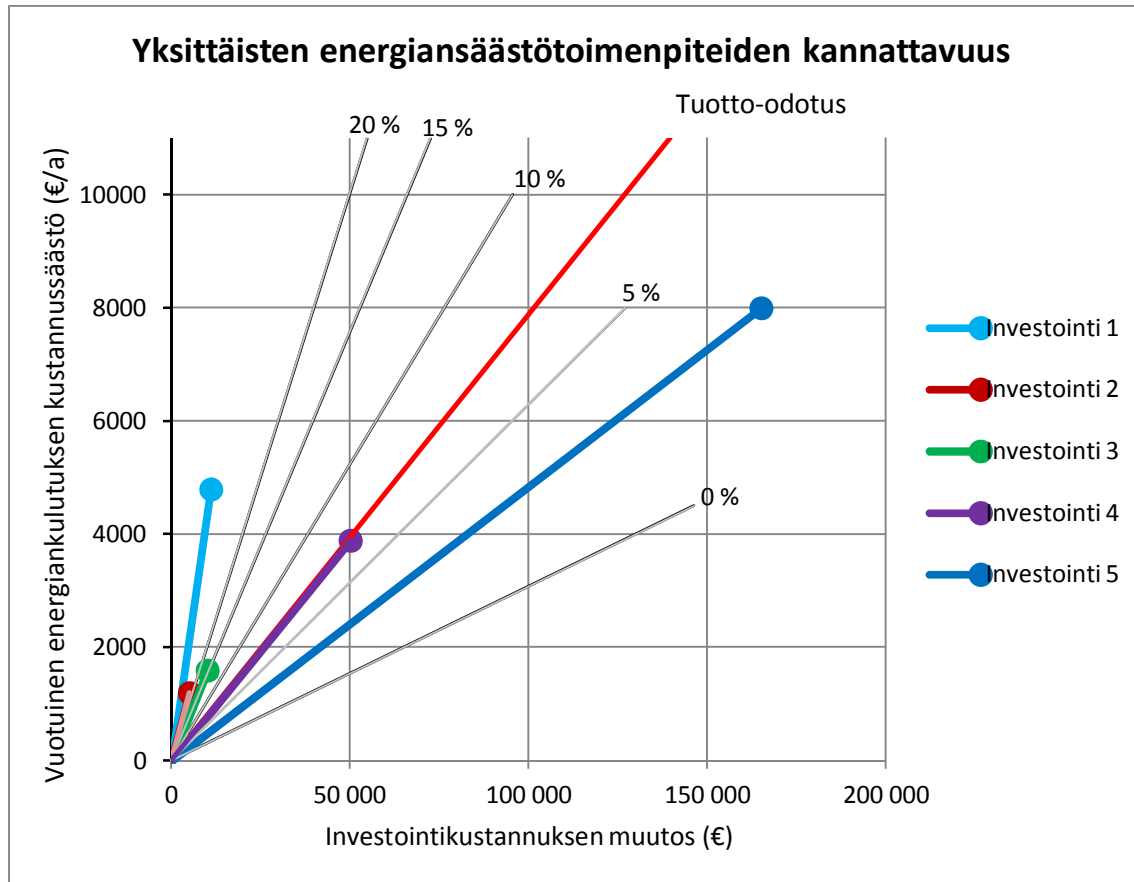
Kuten edellä todettiin, riippuu sisäinen korkokanta investoinnin pitoajasta. Erilaisia investointien sisäisiä korkoja puolestaan on vaikea vertailla keskenään mikäli niiden pitoajat ovat erilaiset. Esimerkiksi rakennuksen seinärakenteeseen tehtävän investoinnin pitoaika voi olla 50 vuotta ja valaistukseen tehdyn investoinnin pitoaika vain 15 vuotta. Tästä syystä Enno Abel (2010 s.7-9) on todistanut, että tekemällä eripituisista investointien pitoajoista investointisummalla painotettu keskiarvo ei aiheuteta suurta virhettä sisäisten korkojen vertailulle.

Enno Abel on myös todistanut (2010, s. 9-10), että lyhyempien pitoaikojen omaavien investointien uusintainvestoinnit, kuten esimerkiksi seinien 50 vuoden käyttöikäen mahtuvat valaistuksen uusintainvestoinnit, voidaan yksinkertaisuuden vuoksi jättää huomiotta aiheuttamatta suurta virhettä tarkasteluun. Tällä tavoin saadaan aikaan tehokas ja yksinkertainen vertailumenetelmä, joka antaa kuitenkin suhteellisen tarkkoja tuloksia.

5.1.4 Menetelmän visualisointi

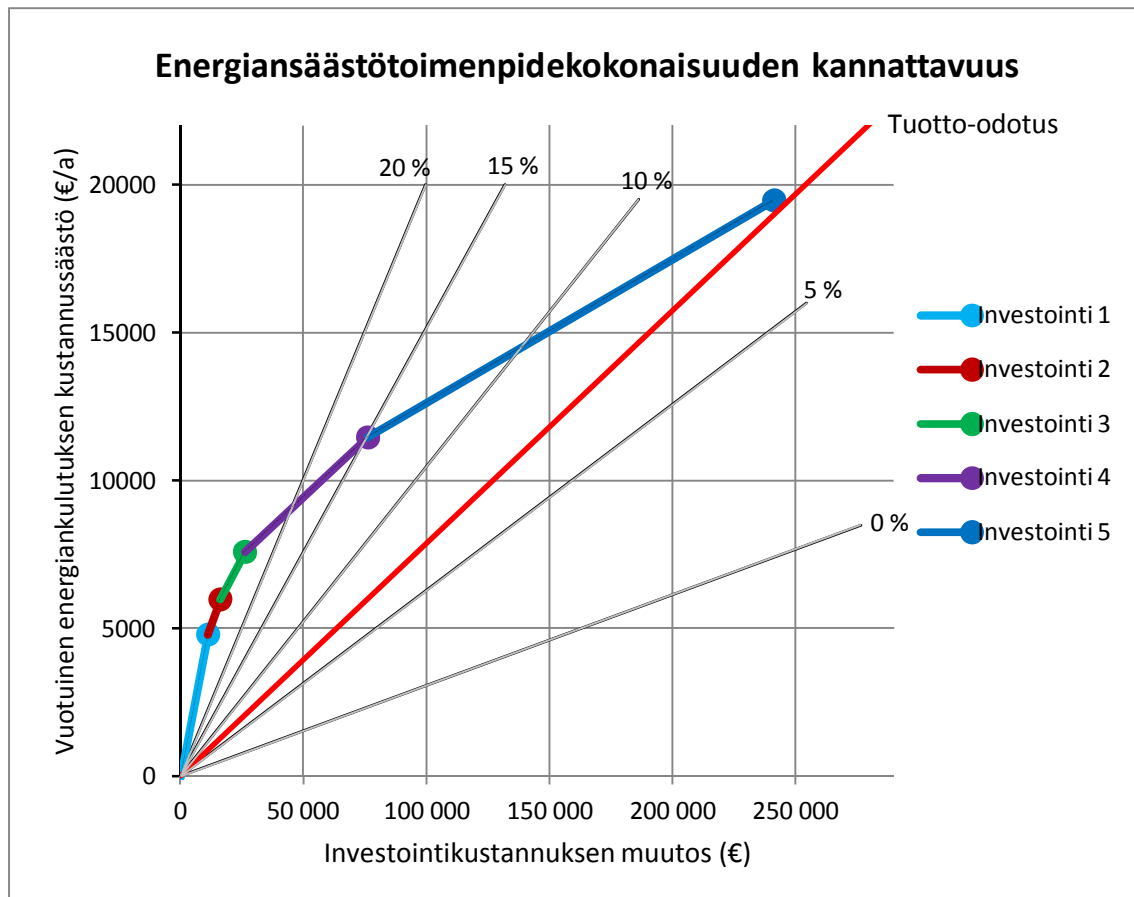
Erilaisten sisäisten korkojen vertailu voidaan tehdä havainnollisemmaksi esittämällä ne kuvaajassa. Yksi havainnollinen tapa on esittää ne kaavan 5.5 mukaisesti siten, että vuotuinen energian kustannussäästö on y-akseli ja investoinnin arvo x-akseli. Tällöin funktion kulmakertoimeksi jää annuiteettitekijä, jonka muuttujista ainoastaan sisäinen korkokanta voi vaihdella koska investoinnin pitoaika on lukittu. Tällä tavoin voidaan siis vertailla eri investointien sisäisiä korkokantoja keskenään samassa kuvaajassa kulmakertoimen jyrkkyyden perusteella.

Kuvaajaan voidaan piirtää myös tuotto-odotuksia kuvaava energian hinnanmuutoksilla korjattu reaalikorkokanta, jolloin voidaan suoraan visuaalisesti todeta investoinnin kannattavuus. Kuvaajassa 5.1 on havainnollistettu investointien vertailua sisäisen korkokannan avulla.



Kuvaaja 5.1. Yksittäisten energiansäästöinvestointien kannattavuuksien vertailu on mahdollista sisäisen korkokannan avulla kunhan investoinnin pitoajat ovat samoja.

Mikäli investoinnin sisäinen korkokanta on suurempi, ja tätä kuvaava käyrä siis jyrkempi, kuin tuotto-odotusten vertailukäyrä, on investointi kannattava. Kuvaajasta 5.1 nähdään, että investoinnit 4 ja 5 eivät ole kannattavia kyseisellä 7 % tuotto-odotuksella. Rinnakkaisten investointien tapauksessa voidaan tarkastella myös tilannetta, jossa verrataan investointien kannattavuutta kokonaisuutena.



Kuvaaja 5.2. Energiansäästötoimenpiteitä voidaan tarkastella havainnollisesti kokonaisuutena asettamalla investoinnit peräkkäin kannattavimmasta kannattamattomimpaan.

Tällöin mahdollisesti kannattamattomat investoinnit voidaan toteuttaa kannattavampien investointien jatkeena. Kuvaajassa 5.2 on havainnollistettu miten käsittelemällä kuvaajan 5.1 investointeja kokonaisuutena voidaan päästä haluttuun 7 % tuotto-odotukseen. Mikäli tuotto-odotukseen ei päästä, voidaan kannattamattomin investointi aina hylätä kunnes kokonaisinvestoinnin sisäinen korko ylittää tuotto-odotuksen.

5.1.5 Kustannusten kohdistaminen

Energiansäästöinvestoinnit olemassa olevissa rakennuksissa tehdään usein muun remontin yhteydessä. Lähtökohta koko remontille on siis joku muu kuin energiatehokkuuden parantaminen. On erittäin tärkeää, että energiansäästöinvestoinnin kustannukset on kohdistettu tällaisissa tilanteissa oikein, sillä muussa tapauksessa investoinnin kannattavuudesta ei synny oikeaa kuvaa.

Tyypillinen esimerkki on ikkunaremontti. Mikäli korjauskohteen ikkunat ovat niin huonossa kunnossa, että ne vaativat vähintään perusteellista kunnostusta, mahdollisesti jopa ikkunoiden uusimista kokonaan, voidaan tarkastella tilannetta, jossa korjaustoimenpiteen tai uusien perusikkunoiden sijaan asennettaisiinkin U-arvoltaan huomattavasti paremmat energiansäästöikkunat. Tällöin energiansäästöremontin kustannuksiksi tulisi valita ainoastaan kalliimmista ikkunoista koituva lisäkustannus verrattuna välttämättömään toimenpiteeseen.

Mikäli kustannuksia ei kohdisteta oikein, ei sisäisen korkokannan vertaaminen tuotto-odotusten mukaiseen korkokantaan tuota oikeaa johtopäätöstä investoinnin kannattavuudesta. (Kurvinen, 2011)

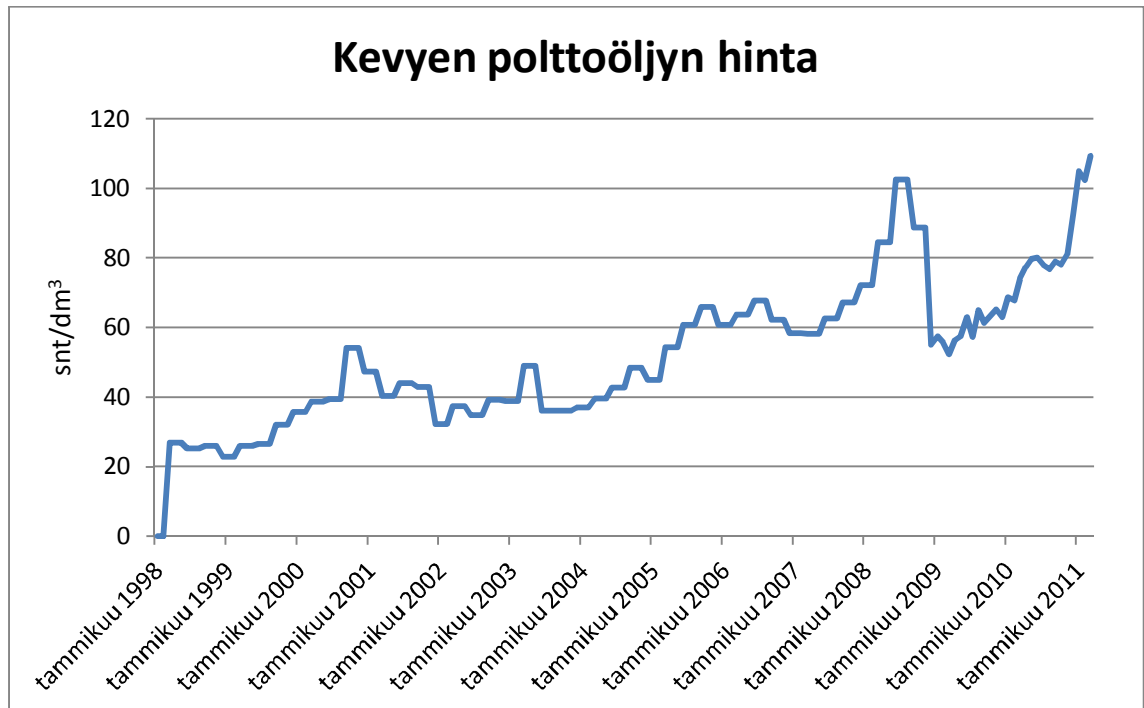
5.2 Koulun A energiansäästöinvestoinnit

Koulun A tapauksessa oletetaan, ettei koululle ole suunnitteilla remonttia, jonka yhteydessä energiansäästötoimenpiteet tehtäisiin. Kustannustarkastelussa on siis otettava huomioon kaikki mahdolliset remontin kuluerät.

Investointien kannattavuuden vertailemiseksi täytyy osata arvioida eri investointien kustannuksia. Tässä työssä kustannuksia arvioidaan pääasiassa Haahtelan Talonrakennuksen kustannustieto –kirjan avulla. Koulu A sijaitsee Pirkanmaalla, joten hinta-arvioissa käytetään hintaindeksiä 75, joka vastaa kesän 2011 hintatasoa Tampereella ja sen ympäristökunnissa. Teoksen hinnat ovat verottomia hintoja. Koska polttoaineen hintaa käsitellään verollisena, on myös korjaushintoihin lisättävä vero. Työssä oletetaan yksinkertaisesti investoinnin kokonaishinnan arvonlisäverokannaksi 22 %.

5.2.1 Investointien vertailu

Investointien vertailemiseksi on lyötävä lukkoon yhteiset lähtöarvot. Koulussa on öljylämmitys, joten polttoöljyn hinta on päätettävä. Polttoöljyn keskimääräinen hinta heinäkuussa 2011 oli noin 1 €/l (Kevyen polttoaineen hinnat, 2011), eli 11 €/kWh, kun oletetaan, että kattilahyötysuhde on 0,9 ja oletetaan, että 1 dm³ polttoöljyä vastaa noin 10 kWh:ia.



Kuvaaja 5.3. Kevyen polttoöljyn hinnan kehitys (Tilasto, 2011).

Kuvaajasta 5.3 nähdään, että polttoöljyn hinta on vuodesta 1998 kallistunut keskimäärin 13 % vuosivauhdilla. Yleinen inflaatiokehitys aikavälillä on puolestaan ollut elinkustannusindeksin mukaan keskimäärin 1,5 % (SVT, 2010b). Polttoöljyn hintakehityksen voidaan kuitenkin olettaa hidastuvan taloudellisen epävarmuuden lisääntyessä. Tästä syystä oletetaan polttoöljyn hinnan kehittyvän tulevaisuudessa ainoastaan noin 5 % yleistä inflaatiokehitystä nopeammin.

Investointien pitoajoiksi valitaan yläpohjan osalta 30 vuotta ja patteriverkon perussäädön ja ikkunoiden osalta 20 vuotta. Tällöin saadaan kustannuksilla painotetuksi keskimääräiseksi investointien pitoajaksi 24 vuotta.

Investoinneille asetetaan 5 % reaalin tuottovaatimus. Kun huomioidaan energian hinnan kehitys, voidaan todeta reaalisen tuotto-odotuksen investoinnille olevan 0 %.

5.2.2 Yksittäisten investointien vertailua

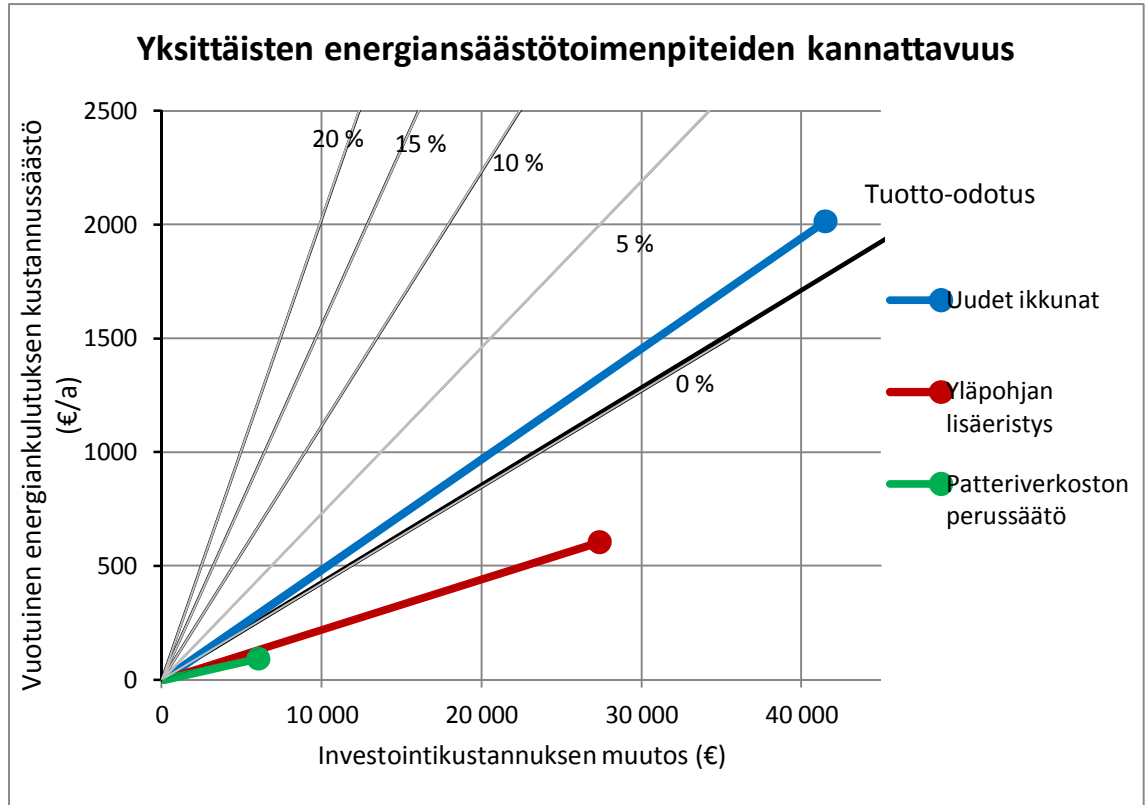
Edellä todettiin koulun A patteriverkoston perussäädöstä, että se ei juurikaan tuota energiansäästöä. Tästä syystä sen ei myöskään oleteta olevan kannattava energiansäästön investointina. Patteriverkoston perussäätö voidaan jättää huomioimatta kustannustarkasteluissa, mikäli oletetaan, että kahden muun investoinnin osalta energiansäästöihin ei tule merkittäviä muutoksia patteriverkoston perussäädön pois jättämisellä. Tarkastelun tarkoituksena olikin lähinnä todeta millaisella keskilämpötilan laskulla koululla selvittäisiin, mikäli patteriverkko haluttaisiin tasapainottaa ilman lämmitysenergian kulutuksen kasvua. Investointia voidaan kuitenkin tarkastella osana energiansäästön investointeja olettamalla perussäädön hinnaksi noin 6000 €. Tällöin, keskimääräisellä 24 vuoden pitoajalla, yksityiskohtaisen laskentamallin mukainen 1200 kWh:n vuotuinen energiansäästö vastaa noin -7 % sisäistä korkoa. Toisin sanoen investointi ei ole kannattava. Koska rakennuksen vaipan lisälämmöneristykseen oletetaan jo itsessään tasaavan huone- lämpötilojen eroja, jätetään patteriverkoston perussäätö koulun A tapauksessa tähän, eikä sitä oleteta tehtävän edes yhdessä muiden investointien kanssa.

Ikkunoiden vaihto edellyttää, että koulun vanhat ikkunat puretaan. Tämän kustannus on 29 €/m² (Haahtela & Kiiras, 2011). Uusien ikkunoiden kustannusta voidaan arvioida, kun tiedetään, että koulun ikkunoiden keskimääräinen ala on 1,8 m² ja kokonaisala 110 m². Kyseisen kokoisten uusien, U-arvoltaan 1,0 W/m²K olevien, ikkunoiden kustannus asennettuna on noin 280 €/m² (Haahtela & Kiiras, 2011). Ikkunoiden vaihdon verottomaksi kokonaishinnaksi saadaan tällöin noin 34 000 €. Verollisen kokonaishinnan oletetaan olevan yksinkertaisesti 22 % suurempi, eli 41 500 €. Kun tiedetään, että yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan ikkunaremontin aiheuttama vuotuinen lämmitysenergiesäästö on 25 MWh, voidaan keskimääräisellä 24 vuoden pitoajalla todeta, että investoinnin sisäinen korko on 1,3 % - eli investointi on kannattava.

Vinon yläpohjan lisälämmöneristys asennettuna maksaa verottomana noin 80 €/m² (ROK, 2011). Hinta on laskettu ullakon lattiapinta-alaa kohti, joka koulun A tapauksessa on 280 m². Tällöin investoinnin verottomaksi kokonaishinnaksi muodostuu 22 500 €. Verolliseksi kokonaishinnaksi tulee tällöin noin 27 500 €. Yläpohjan lisä-

lämmöneristys tuottaa yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan noin 7,6 MWh:n vuotuisen lämmitysenergiesäästön. Näiden tietojen avulla saadaan 24 vuoden investoinnin pitoajalle sisäiseksi koroksi -4,5 %, eli investointi yksinään ei ole kannattava.

Kuvaajassa 5.4 on havainnollistettu kaikkien kolmen investoinnin kannattavuutta sisäisen koron avulla.

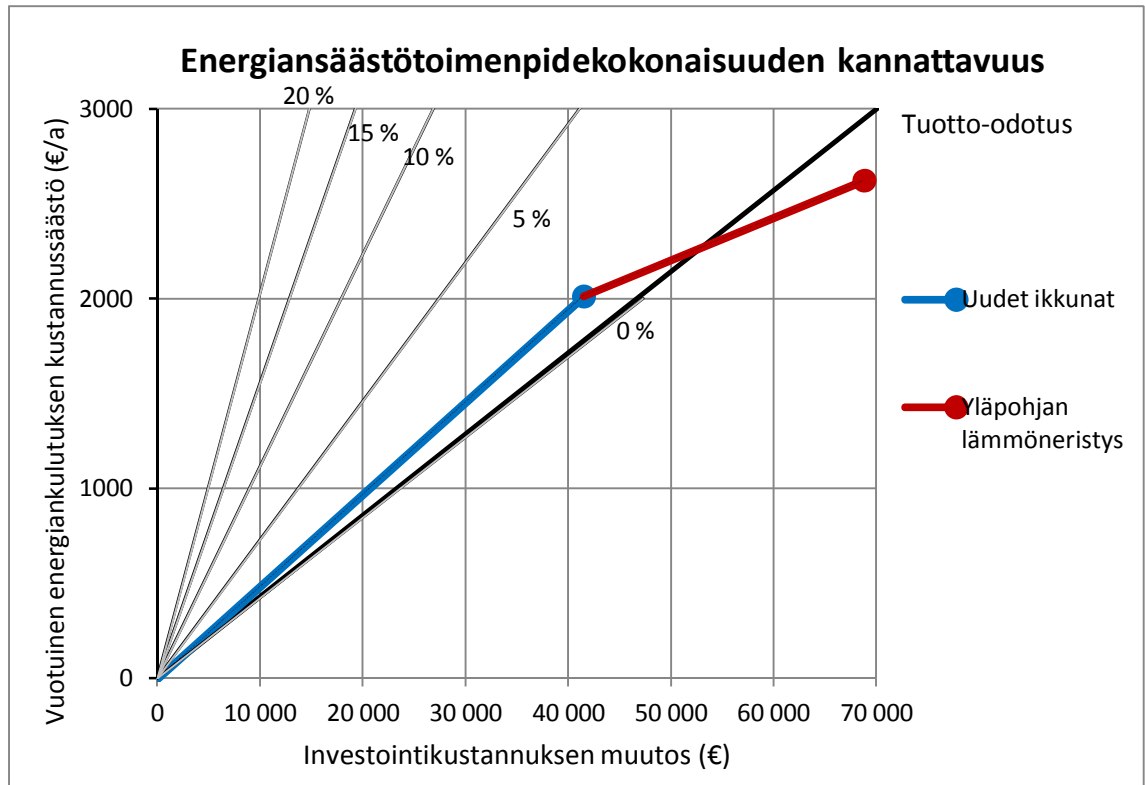


Kuvaaja 5.4. Koulun A tarkasteltujen energiansäästötoimenpiteiden kannattavuudet havainnollistettuna sisäisen koron avulla.

Kuvaajasta on helppo todeta edellä hypoteettisena toimenpiteenä käsitellyn patteriverkoston perussäädön ja yläpohjan lisäeristyksen olevan kannattamattomia toimenpiteitä.

5.2.3 Investointien ketjuttaminen

Mikäli koulun A investoinnit ketjutetaan siten että investointien energiansäästöt ja kustannukset tarkastellaan yhtenä investointina, nähdään, etteivät investoinnit yhdessäkään tee yläpohjan lisäeristämisestä kannattavaa. Tällöin yhdistetyn ikkunoiden uusinnan ja yläpohjan lisäeristyksen sisäiseksi koroksi tulisi noin -0,7 %, joka on juuri ja juuri pienempi kuin tuotto-odotukseksi asetettu 0 %. Kuvaajassa 5.5 on esitetty yhdistettyjen investointien kannattavuus sisäisen koron menetelmällä.



Kuvaaja 5.5. Ikkunoiden uusinnan ja yläpohjan lisäeristämisen yhdistetty kannattavuus esitettynä sisäisen koron menetelmällä koulussa A.

Kuvaajasta nähdään, että edes jättämällä kannattamaton patteriverkoston perussäätö tarkastelujen ulkopuolelle, ei ikkunoiden uusiminen tee yläpohjan lisäeristämisestä kannattavaa. Yläpohjan lisäeristyksen tulisi olla noin 10 000 euroa halvempaa, että investoinnit yhdessä olisivat kyseisellä tuotto-odotuksella kannattavia.

5.2.4 Ero korjattuun yksinkertaiseen malliin

Seuraavassa taulukossa 5.1 on vertailtu korjatun yksinkertaisen simulointimallin mukaisten energiansäästöjen avulla saatuja kannattavuuksia edellä esitettyihin yksityiskohtaisen simulointimallin vastaaviin kannattavuuksiin.

Taulukko 5.1. Eri simulointimallien mukaisten energiansäästöjen perusteella lasketut sisäiset korot koulun A investoinneille. Yhdistetyt investoinnit tarkoittavat yksittäisen vaihtoehtoisen investoinnin yhdistämistä perusinvestointiin.

Investointien sisäiset korot	Yksityiskohtainen		Yksinkertainen korjattu	
	Yksittäinen investointi	Yhdistetyt investoinnit	Yksittäinen investointi	Yhdistetyt investoinnit
Perusinvestoinnit				
Patteriverkoston perussäätö	-6,6		-3,7	
Vaihtoehtoiset investoinnit				
Uudet ikkunat	1,3	0,5	0,7	0,2
Yläpohjan lisälämmöneristys	-4,5	-4,9	-5,1	-4,9
Investoinnit yhdessä	-0,7	-1,1	-1,3	-1,5

Taulukosta nähdään, että investointien sisäisissä koroissa on eroja etenkin perusinvestoinnin ja ikkunoiden tapauksessa, mutta eri investointien kannattavuuksista voidaan silti tehdä samat johtopäätökset kuin yksityiskohtaisenkin mallin mukaisessa tarkastelussa. Taulukosta voidaan myös nähdä, että molempien mallien mukaan ikkunoiden uusiminen tekisi myös patteriverkoston perussäädön kannattavaksi.

5.3 Koulun B energiansäästöinvestoinnit

Koulun B tapauksessa oletetaan, että koulussa on joka tapauksessa tehtävä ikkunoihin ja ilmanvaihtoon liittyen korjaustoimenpiteitä. Ilmanvaihdon korjauksen oletetaan olevan motivoitu terveydellisillä syillä eikä sitä huomioida energiansäästötarkasteluissa. Ikkunoiden tiivistäminen sitä vastoin havainnollistetaan osana energiansäästöinvestointeja kannattavuuden näkökulmasta. Kahden muun ikkunoihin liittyvän investoinnin kannattavuutta tarkastellaan tiivistysvaihtoehdon vaihtoehtona.

Kuten koulun A tapauksessakin käytetään investointikustannusten selvittämiseksi apuna Haahtelan Talonrakennuksen kustannustieto –kirjaa. Koska koulu B sijaitsee Pirkanmaalla, voidaan myös koulun B tapauksessa kustannuksia arvioida hintaindeksin 75 avulla. Kirjan hintoihin lisätään arvonlisävero samalla tavalla yksinkertaisesti oletamalla koko investoinnin arvonlisäverokannaksi 22 %.

Ennen kuin voidaan tarkastella koulun B energiansäästöinvestointien kannattavuutta, täytyy selvittää joka tapauksessa tehtävien niin sanottujen perusinvestointien kustannukset. Muussa tapauksessa ei saada oikeaa kuvaa energiansäästöinvestoinnin kannattavuudesta.

5.3.1 Perusinvestointien kustannukset

Energiansäästöinvestointien tarkastelu lähtee liikkeelle oletuksesta, että patteriverkosto on säädetty. Tämä johtuu, kuten edellä on mainittu, siitä että energiansäästön simulointi on luotettavampaa, kun lämpötilaprofiili on tasainen. Muita toimenpiteitä ei siis voida tarkastella täysin itsenäisinä, vaan patteriverkoston perussäädön jatkeena.

Patteriverkoston perussäädön kustannukset ovat karkeasti luokkaa 35-40 €/patteri, josta 10 €/patteri on itse säätötyön osuus, muu koostuu mittauksesta ja laskennasta (*Kärkkäinen, Aatos*). Koululla B on noin 260 patteria, jolloin tapauksessa patteriverkoston perussäädön kustannukseksi saadaan 10 000 €. Voidaan varovasti arvioida, että muodostuvan menovesisäädön korjauksen ja patteriventtiilien uusinnan kanssa kustannus on noin 15 000 euroa. Perussäädön tuottama vuotuinen energiansäästö on 89,5 MWh. Näiden tietojen, sekä oletetun pitoajan sekä energian hinnan avulla saadaan sisäiseksi koroksi 41,7 %.

Kuten edellä todettiin, ovat koulun B ikkunat huonossa kunnossa. Tästä syystä oletetaan, että ikkunoiden osalta joudutaan suorittamaan melko perusteellinen remontti. Remontti sisältää muun muassa osittaista ikkunapuitteiden uusimista ja lasituksia sekä karmien ja puitteiden maalauksia. Toimenpiteen verottomaksi kustannukseksi arvioi-

daan 185 €/m^2 (Haahtela & Kiiras, 2011). Ikkunoiden keskimääräinen ala koululla B on noin $1,5 \text{ m}^2$ ja kokonaisala 545 m^2 . Tämän lisäksi ikkunoiden alle joudutaan asentamaan yhteensä noin 50 tuloilmalaitetta, joiden kustannukseksi arvioidaan 10 000 euroa. Tämä koostuu arviosta, jonka mukaan tuloilmalaitteen asennus maksaa veroineen 100 €/kpl ja itse laitteen kustannus on 100 €/kpl (Vim-Ilma Oy). Tuloilmalaitteiden avulla vähennetään luokkien vedon tunnetta, joten kyse ei ole energiansäästöinvestoinnista. Korjaustoimenpiteen verolliseksi kustannukseksi muodostuu noin 110 000 €. Ikkunoiden uusimisen oletetaan parantavan rakennuksen ilmatiivyyttä siten, että vuotoilmanvaihto n_{50} paranee arvosta 5 1/h arvoon 4 1/h. Tämä tuottaa yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan 25,7 MWh/a säästön. Näiden tietojen avulla saadaan investoinnin sisäiseksi koroksi -8,9 %. Kun ikkunoiden kunnostus ja patteriverkoston perussäätö yhdistetään, saadaan investointien yhteiseksi kannattavuudeksi 2,5 %.

Ilmanvaihdon perusinvestointina pidetään osan huippuimureista uusimista. Kustannuksiin oletetaan otettavan mukaan myös koulun vanhan puolen poistoilmaventtiileiden säätämistä ja kanavien puhdistamista. Kustannukseksi arvioidaan noin 10 000 euroa (Haahtela & Kiiras, 2011).

5.3.2 Investointien vertailu

Eri investointien vertailemiseksi on lyötävä lukkoon muutamia lähtöarvoja kuten investointien pitoajat sekä energian hinta. Koulun B tapauksessa investointien pitoajaksi arvioidaan kaikkien investointien osalta 20 vuotta. Toisin sanoen oletetaan, että jokaisen investoinnin on maksettava itsensä takaisin 20 vuodessa sillä lisäoletuksella, että investoinnin jäännösarvo kyseisen ajan kuluttua on nolla. Lämmitysenergianlähteenä on kaukolämpö. Kaukolämmön hinta Tampereella vuonna 2011 vaihtelee välillä 63,5-84,88 €/MWh välillä teholuokasta riippuen (Kaukolämmön hinnat, 2011). Oletetaan tarkastelemissa kaukolämmön hinnaksi 70 €/MWh. Vuotuinen energianhinnan nousun oletetaan investointien pitoaikana olevan 2 % yli inflaatiokehityksen. Investoinneille asetetaan 7 % reaalin tuottovaatimus, joten energian hinnankehitys huomioiden tuotto-odotuksen laskelmissa tulee olla 5 %.

Voidaan heti todeta, että energiansäästön näkökulmasta pakolliset korjaustoimenpiteet eivät, edes hyvästä patteriverkoston perussäädön kannattavuudesta huolimatta, täytä asetettua 5 % tuotto-odotusta.

Energiansäästöinvestointivaihtoehdot voidaan jakaa kolmeen eri osaan: Patteriverkoston perussäätö ja ikkunoiden tiivistys (jotka tehdään kaikissa tarkasteltavissa tapauksissa), ikkunoihin kohdistuvat energiansäästöremontit ja ilmanvaihtojärjestelmään kohdistuvat energiansäästöremontit. Investointeja tarkastellaan kaikkia ensin erikseen ja tämän jälkeen investoinnit ketjutetaan ja tarkastellaan erilaisten energiansäästöratkaisuiden yhdistämistä parhaan lopputuloksen löytämiseksi.

5.3.3 Energiansäästöinvestoinnit erillisinä investointeina

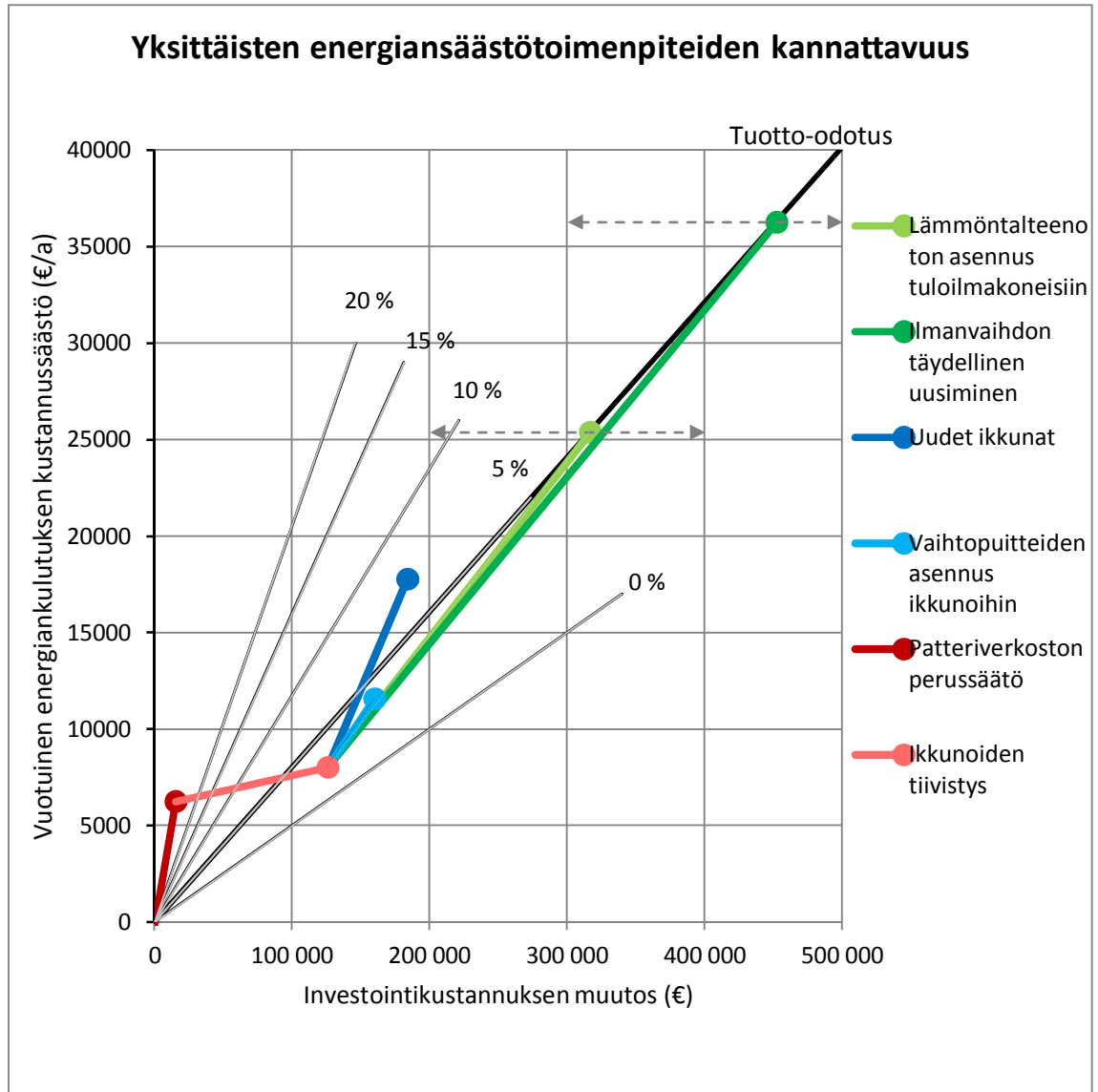
Vaihtopuitteiden verottomaksi kustannukseksi asennuksineen voidaan arvioida 225 €/m², kun tiedetään ikkunoiden keskimääräinen koko ja koko ikkunapinta-ala (*Haahtela & Kiiras, 2011*). Vaihtopuitteiden asennuksen yhteydessä tehtävien ikkunapuitteiden ja karmien korjausten voidaan olettaa olevan huomattavasti kevyemmät kuin perusinvestoinnin tapauksessa. Toimenpiteisiin voidaan olettaa kuuluvan sisäpuitteiden ja karmien maalausta, pesua ja tiivisteiden vaihtoa, jonka veroton kustannus Talo 2000 -nimikkeistön mukaan on 62 €/m² (*Haahtela & Kiiras, 2011*). Kun huomioidaan, että pakolliseen ikkunoiden tiivistämisen ja korjaukseen liittyvät korjauskustannukset olivat alun perin 185 €/m², voidaan lisäpuitteiden asennuksesta vähentää 123 €/m². Tällöin ikkunapuitteiden kokonaiskustannukseksi saadaan 102 €/m². Veroton hinta investoinnille olisi siis noin 55 600 €. Investoinnin verolliseksi kokonaishinnaksi muodostuisi tällöin noin 67 800 €. Vaihtopuitteiden asennuksella saavutetaan yksityiskohtaisen simulointimallin mukaan 50,5 MWh:n vuotuinen energiansäästö. Näillä tiedoilla investoinnin sisäiseksi koroksi saadaan 8,3 %. Kuten edellä todettiin, ei investointeja kuitenkaan voi tarkastella itsenäisinä, vaan patteriverkoston perussäädön jatkeena. Tällöin investointien sisäiseksi koroksi tulisi 3,9 %, joka ei juuri riitä tekemään investoinnista kannattavaa tuotto-odotuksen ollessa 5,0 %.

Ikkunoiden uusiminen tarkoittaa, että vanhat ikkunat puretaan kokonaan pois. Tämän kustannus on, kuten edellä on esitetty, 29 €/m² (*Haahtela & Kiiras, 2011*). Mikäli uusien ikkunoiden kustannus on noin 294 €/m² (*Haahtela & Kiiras, 2011*), on kokonaiskustannus ikkunoiden uusimisesta tällöin (huomioiden, että ikkunoiden kunnossuoksessa säästetään 156 €/m²) 138 €/m² eli noin 75 100 €. Verolliseksi kokonaiskustannukseksi investoinnille muodostuu tällöin 91 600 €. Ikkunoiden vaihtamisella saavutettava vuotuinen energiansäästö on 139,0 MWh, jolloin itsenäisen investoinnin sisäiseksi koroksi muodostuisi 15,9 %. Kun pakolliset investoinnit huomioidaan, tulee kokonaisinvestointien sisäiseksi koroksi 7,3 %, joka ylittää tuotto-odotukseksi asetetun 5 %, joten ikkunoiden uusimisen voidaan todeta tekevän pakolliset investoinnit kannattaviksi.

Ilmanvaihtoremonttien osalta oletetaan, että investointi päättyy aina tuotto-odotuksen mukaiseen lopputulokseen. Toisin sanoen selvitetään miten suuri investointi saa suurimmillaan olla, että investointi on kannattava. Tähän päädyttiin, koska koulusta ei ollut riittävästi tietoa kyseisten investointien kustannusarvion laadintaan. Tuotto-odotuksen mukaisen sisäisen koron ehdon täyttymiseksi saa tuloilmakoneisiin asennettavat lämmön talteenottolaitteistot maksaa korkeintaan 201 000 €. Ilmanvaihdon täydellinen uusinta puolestaan saa maksaa korkeintaan 327 000 €. Ilmanvaihdon täydellisen uusimisen tapauksessa on huomioitu uusien tuloilmapuhaltimien myötä kasvava sähkökulutuksen kasvu noin 7 MWh/a:lla, joka vaikuttaa saatavaan energiansäästöön ja sitä kautta remontin mahdolliseen investointikustannukseen. Kun vielä huomioidaan, että ilmanvaihdon uusiminen tulo- ja poistoilmanvaihdoiksi poistaa tarpeen tuloilmako-

jeiden asentamiselle rakennuksen vanhan osan seiniin, saa ilmanvaihtoremontti korkeintaan maksaa 337 000 €.

Edellä esitetyt tiedot voidaan helposti havainnollistaa kuvaajan 5.4 kaltaisella esitystavalla huomioiden, että patteriverkoston perussäätö ja ikkunoiden tiivistys on otettava huomioon jokaisen investoinnin kohdalla. Kuvaajassa 5.6 on esitetty eri energiansäästöinvestoinnit ja niiden kannattavuus.



Kuvaaja 5.6. Eri investointien kannattavuudet esitettynä sisäisen koron avulla koulussa B.

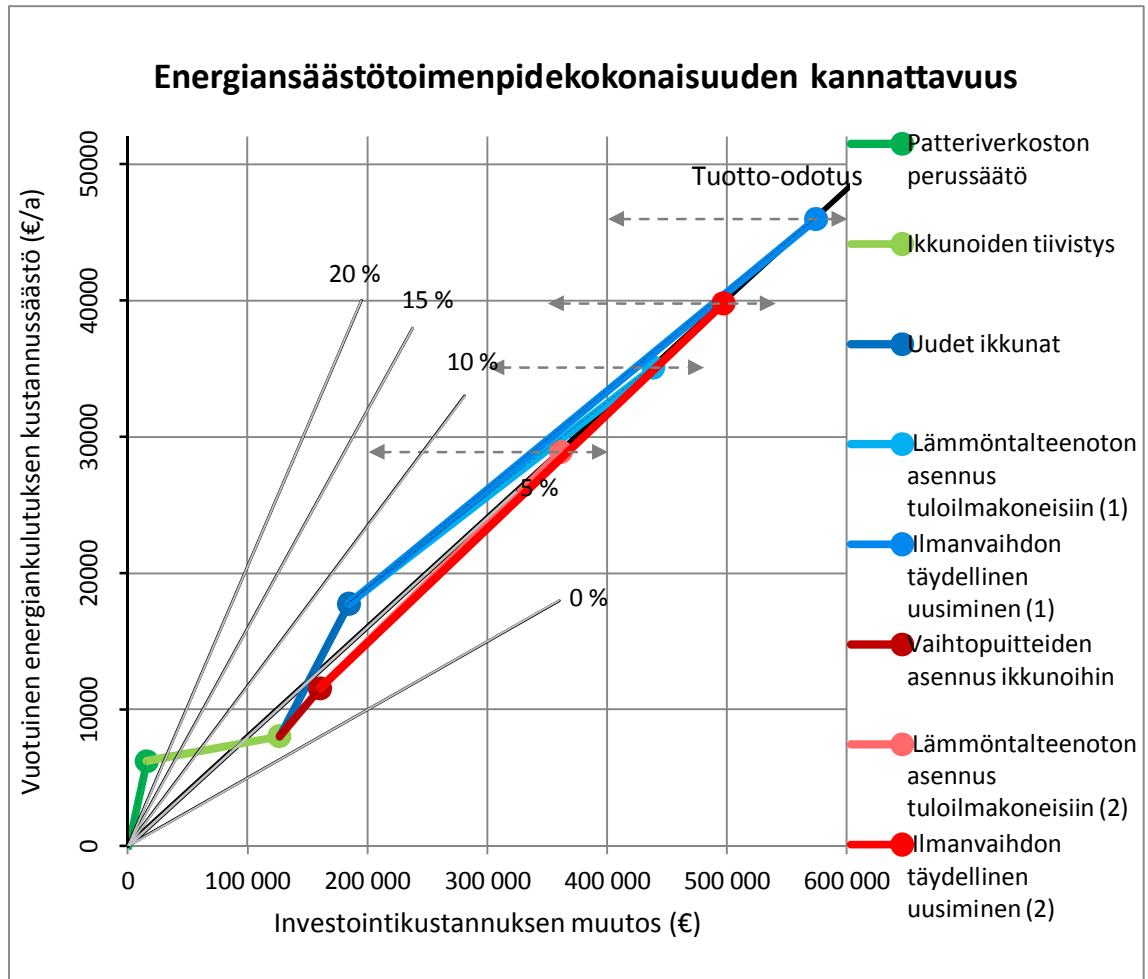
Kuvaajasta nähdään edellä esitetyt tiedot kannattavuuksista ja kustannuksista suoraan havainnollisessa graafisessa muodossa. Punaisella sävyllä merkittyjen patteriverkoston perussäädön ja ikkunoiden tiivistyksen oletetaan olevan pakollisia investointeja. Kuvaajasta on helppo päätellä, että ainakin ikkunoiden uusimisella tehdään myös pakollisista investoinneista kannattavia.

5.3.4 Investointien ketjuttaminen

Investoinnit voidaan koulun B tapauksessa ketjuttaa neljällä eri tavalla johtuen investointien rinnakkaisuudesta. Tässä työssä investointeja on tarkasteltu siten, että investoinnit on laitettu järjestykseen ensisijaisesti kannattavuuden mukaan, ja toissijaisesti sen mukaan miten tarkkaan investoinnin kustannus tiedetään. Ilmanvaihtoremonttien osalta ei ole tarkkaa tietoa niiden kustannuksista, joten ne on asetettu investointeina viimeisiksi ja asetettu investointiketjun ehdoksi tuotto-odotuksen mukainen korko. Jokainen investointien yhdistelmä täyttää siis 5 % tuotto-odotuksen. Näin saadaan arvio siitä mikä voi ilmastointiremontin arvo korkeintaan olla, että investointien kokonaisuus on vielä kannattava. Remontin maksimikustannuksen avulla voidaan arvioida investoinnin kannattavuutta pyytämällä kustannusarvio tai etsimällä kirjallisuudesta samankaltaisten projektien kustannuksia.

Edellä esitettyjen kustannusten perusteella voidaan laskea eri ilmanvaihtoremonteille maksimikustannukset riippuen siitä mihin ikkunaremonttiin päädytään. Mikäli päädytään valitsemaan patteriverkoston perussäädön lisäksi vaihtopuiteikkunoiden asennus, saa lämmön talteenottolaitteiston asentaminen tuloilmakoneisiin maksaa korkeintaan noin 201 000 €. Ilmanvaihdon täydellinen uusiminen puolestaan saa maksaa vaihtopuiteikkunoiden kanssa maksimissaan noin 336 000 €. Jos taas päädytään valitsemaan uudet ikkunat, saavat lämmön talteenoton asentaminen tuloilmakoneisiin ja ilmastoinnin uusiminen kustantaa korkeintaan noin 254 000 € ja 390 000 €. Eli mikäli päädytään valitsemaan uudet ikkunat, voidaan ilmanvaihtoon käyttää noin 53 000 euroa enemmän saman kannattavuuden aikaansaamiseksi.

Kuvaajassa 5.7 on esitetty investointien ketjuttaminen vielä graafisesti.



Kuvaaja 5.7. Investointien ketjuttamisella aikaan saatu kannattavuus sisäisen koron avulla esitettynä koulussa B.

Kuvaajasta voidaan todeta sama kuin edelläkin: ikkunoiden uusiminen on kannattavampi vaihtoehto koulun B tapauksessa.

5.3.5 Ero korjattuun yksinkertaiseen malliin

Seuraavassa verrataan edellä tarkasteltuja koulun B yksityiskohtaisen simulointimallin mukaisilla energiansäästöillä laskettuja investointien kannattavuuksia korjatun yksinkertaisen simulointimallin mukaisiin kannattavuuksiin. Taulukossa 5.2 on esitetty investointien kannattavuudet.

Taulukko 5.2. Eri simulointimallien mukaisten energiansäästöjen pohjalta lasketut sisäiset korot koulun B investoinneille. Yhdistetyt investoinnit tarkoittavat perusinvestointien tapauksessa perusinvestointien yhdistämistä ja vaihtoehtoisten investointien tapauksessa yksittäisen vaihtoehtoisen investoinnin yhdistämistä perusinvestointeihin.

Investointien sisäiset korot	Yksityiskohtainen		Yksinkertainen, Aukot mukana	
	Yksittäinen investointi	Yhdistetyt investoinnit	Yksittäinen investointi	Yhdistetyt investoinnit
Perusinvestoinnit				
Patteriverkoston perussäätö	41,7 %		44,1 %	
Ikkunoiden tiivistys	-8,9 %	2,5 %	-10,3 %	2,5 %
Vaihtoehtoiset investoinnit				
Vaihtopuitteiden asennus	8,3 %	3,9 %	8,3 %	3,9 %
Uudet ikkunat	15,9 %	7,3 %	14,2 %	6,7 %
Lämm.talteenoton asennus tulo-	6,5 %	5,0 %	6,3 %	5,0 %
lok.				
Ilmanvaihdon täydellinen uusiminen	5,9 %	5,0 %	6,0 %	5,0 %

Taulukosta nähdään, että etenkin yksittäisten investointien sisäisissä koroissa on pieniä eroja kyseisten mallien välillä, mutta eri investointien kannattavuuksista voidaan silti tehdä samat johtopäätökset molempien mallien mukaisessa tarkastelussa.

Erillisinä investointeina lämmön talteenoton asennukseen tuloilmakoneisiin voidaan korjatun yksinkertaisen simulointimallin mukaan laskettuna käyttää korkeintaan 229 000 €, kun yksityiskohtaisen mallin mukaan laskien voidaan käyttää 201 000 €. Ilmanvaihdon täydelliseen uusimiseen saa käyttää korkeintaan 314 000 € kun yksityiskohtaisen mallin mukaan laskien voidaan käyttää 336 000 €.

Investointeja ketjuttamalla on mahdollista käyttää vaihtopuiteinvestoinnin yhteydessä korkeintaan 230 000 € lämmön talteenoton asentamiseen tuloilmakoneisiin tai 314 000 € ilmanvaihdon täydelliseen uusimiseen. Yksityiskohtaisen mallin mukaan laskeissa vastaavat summat olivat 201 000 € ja 336 000 €. Ikkunoiden uusimisen tapauksessa ilmanvaihtoinvestointeihin voidaan käyttää korkeintaan lämmön talteenoton asentamiseen 272 000€ tai täydelliseen uusintaan 356 000 €, kun yksityiskohtaisen mallin mukaan summat ovat 254 000 € ja 390 000 €.

Tarkastelujen perusteella voidaan todeta, että ilmanvaihtoinvestointien osalta korjatun yksinkertaisen simulointimallin käyttäminen aiheuttaa investoinnin mahdolliseen maksimiarvoon korkeintaan 15 % virheen. Tätä voidaan pitää kohtuullisen merkittävänä virheenä, mutta saatava kustannushaarukka on virheestäkin huolimatta todella hyödyllinen investointien kannattavuutta arvioitaessa.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tarkasteltiin erilaisten energiatehokkuutta parantavien investointien kannattavuutta kahdessa pirkanmaalaisessa koulussa, joista oli käytössä toisesta projektista saatua mittaustietoa energiankulutuksista ja sisäolosuhteista. Tarkastelun lähtökohtana oli tilanne, jossa koulujen sisäilmaston laatu hiilidioksidipitoisuuden suhteen oli vähintään sisäilmastoluokituksen tasoa S3 vastaavalla tasolla. Tutkimuksissa mukana olleista kouluista toinen oli niin sanottu huonon energiatehokkuuden omaava koulu ja toinen hyvän energiatehokkuuden omaava koulu. Energiansäästöä tarkasteltiin IDA-ICE simulointiohjelman avulla. Kummastakin koulusta rakennettiin neljä erilaista simulointimallia, eri lähtötietojen määrään perustuen.

Karkein malli tehtiin pelkästään rakennuksen teknisten tietojen, kuten seinä-, välipohja- ja yläpohjarakenteen sekä ikkunapinta-alan avulla käyttäen ilmanvaihdon, valaistuksen, laitteiden, vedenkäytön ja ihmisten aiheuttamien kuormien osalta rakentamismääräysten osan D3 standardikäytön mukaisia oletusarvoja ja aikatauluja. Yksityiskohtainen simulointimalli rakennettiin mahdollisimman tarkasti koulun pohjapiirustuksen mukaiseksi jokainen huone ja ikkuna erikseen mallintaen ja käyttäen lähtötietoina mitattuja huonelämpötiloja ja ilmanvaihdon määrää sekä tietoja oppilasmäärästä ja käyttäjäajoista. Yksinkertainen simulointimalli tehtiin poistamalla yksityiskohtaisesta simulointimallista huonekohtaiset vyöhykkeet ja yhdistämällä rakennuksen ikkunat suuremmiksi kokonaisuuksiksi kuten rakentamismääräysten mukaan rakennetussa mallissakin. Työn edetessä todettiin yksityiskohtaisen ja yksinkertaisen simulointimallin antavan erilaisia tuloksia kokonaislämmönkulutuksessa. Syyksi todettiin yksinkertaisen mallin kerrosten välisen yhteyden puuttuminen. Tämä pienentää sisä- ja ulkoilman välistä paine-eroa ja sitä kautta vuotoilmavirtaa. Lisäämällä aukot yksinkertaiseen simulointimallin välipohjiin antoivat mallit tavoitteiden kannalta riittävän tarkasti samanlaisia tuloksia. Lisätarkasteluna tutkittiin uusissa rakentamismääräyksissä vaaditun huonelämpötilan mallintamiseksi valittavan tyyppitilan valintaan liittyviä ongelmia. Tutkimuksissa tultiin siihen lopputulokseen, että yksiselitteisen tyyppitilan valinta on määräyksissä mainittujen kriteerien avulla melko helppoa.

Eri parannustoimien energiansäästöpotentiaaleja tarkasteltiin esitettyjen simulointimallien avulla. Työssä tultiin siihen lopputulokseen, että rakentamismääräysten lähtötiedoilla tehty (RakMk D3) simulointimalli ja korjaamaton yksinkertainen simulointimalli eivät antaneet riittävän tarkkaa kuvaa energiankulutuksesta eivätkä siten myöskään oikeaa kuvaa suhteellisesta säästöstä. Yksinkertaisen, kerrosten välisillä aukoilla korjatun, simulointimallin antamat tulokset puolestaan olivat energiansäästön osalta riittävän tarkkoja karkeiden kustannusarvioiden tekemiseen. Malli ei kuitenkaan sovellu toimenpiteiden arviointiin, joissa energiansäästön kannalta ratkaisevassa roolissa on rakennuksen vaipan ilmatiiviyden parantaminen. Korkeimmillaan ero yksityiskohtaisen ja korjatun yksinkertaisen simulointimallin mukaisen suhteellisen energiansääs-

tön välillä oli noin 3 prosenttiyksikköä (mikäli vaipan tiiveyttä parantava toimenpide unohdetaan) jota voidaan pitää siedettävänä huomioiden investointien kustannusten arvioinnin karkeus.

Tutkimuksissa tultiin siihen lopputulokseen, että koulun B tapauksessa patteriverkoston perussäätö on kannattavin investointi, mutta samanaikaisesti tehtävän ikkunoiden korjausten tekevän siitä 7 % reaalisella tuottovaatimuksella lievästi kannattamatonta. Ilmanvaihdon lämmön talteenoton asentamisen osalta tutkimuksessa laskettiin summa, joka voidaan investoida, että toimenpide vielä on kannattava. Tuloksen perusteella voidaan sanoa, että ilmanvaihdon lämmön talteenoton jonkin asteinen uusinta/asentaminen on suurella todennäköisyydellä myös kannattava. Koulun A osalta tarkastelluista toimenpiteistä ikkunoiden uusiminen energiatehokkaiksi vaikutti 5 % reaalisella tuottovaatimuksella kannattavalta yläpohjan lisäeristämisen ollessa puolestaan kannattamatonta. Molempien koulujen osalta todettiin, että simuloimalla eri energiansäästötoimenpiteet erillisinä kokonaisuuksina ja yhdistämällä kyseisten simulointien aikaansaamat energiansäästöt ei tehty merkittävää virhettä verrattuna siihen, että molemmat toimenpiteet tehtiin samaan simulointimalliin. Investointien ketjuttamien puolestaan mahdollisti ennestään kannattamattomien investointien toteuttamisen kannattavasti. Koulun B tapauksessa todettiin osan energiansäästöinvestoinneista tekevän jopa tässä työssä pakollisiksi rakennuksen huonon kunnan vuoksi oletetut investoinnit kannattaviksi.

Suurimmaksi hankaluudeksi arvioitaessa energiansäästöinvestointien kannattavuutta muodostui investointien kustannusten arvioiminen. Työssä käytettiin Haahtela & Kiiraksen -kirjaa Talonrakennuksen kustannustieto ja Rakennustieto Oy:n Rakennusosien kustannuksia -kirjaa, joista löytyi karkeit arvioita rakennusosien ja kokonaisuuksien kustannustasoista töineen. Kuitenkin joidenkin investointien, kuten lämmön talteenoton asentaminen, osalta ei osattu arvioida toimenpiteen kustannusta luotettavasti tekemättä laajempia tutkimuksia. Tällöin päädyttiin arvioimaan kyseisen toimenpiteen suurinta hintaa, jolla toimenpide vielä kyseisellä tarkastelujaksolla olisi kannattava. Tämä helpottaa huomattavasti kannattavuusarvion tekemistä. Investointien kannattavuuden tarkastelumenetelmänä sisäisen koron menetelmää pidettiin havainnollisena ja yksinkertaisena. Sen avulla voidaan helposti tehdä johtopäätöksiä investointien kannattavuudesta sekä siitä miten investointien ketjuttaminen kannattaa.

LÄHTEET

Aalto, R. 1983. Energiataloudellisten vertailumenetelmien perusteet. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu, rakennustekniikan osasto. 1983/4. 31 s.

Abel, E. 2010. Ekonomisk bedömning. BELOK Totalprojekt – Energieffektivisering av befintliga lokalbyggnader. [PDF]. Viitattu: 28.6.2011. Saatavissa: <http://www.belok.se/docs/Kortrapporter/Lonsamhetsmodell.pdf>. 17 s.

Alanne, K. 2010. Ene-58.3113 Ilmanvaihtotekniikka. Luentokalvot 2010 Espoo. Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu.

Annex 36 – Retrofitting Educational Buildings – REDUCE. IEA, 2004. [WWW]. [Viitattu 5.9.2011]. Saatavissa: <http://www.annex36.com>.

Asumisterveysohje, Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003. 2003. Helsinki, Sosiaali- ja terveysministeriö. 88 s.

BRITA in PuBs – Bringing Retrofit Innovation to Application in Public Buildings. 6th Framework Programme, EU, 2008. [WWW]. [Viitattu 5.9.2011]. Saatavissa: <http://www.brita-in-pubs.eu>.

C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Luonnos 28.9.2010. Lämmöneristys. Ohjeet 2012. Helsinki. Ympäristöministeriö. 35 s. + liit. 1 s.

D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2011. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki. Ympäristöministeriö. 23 s. + liit. 11 s.

D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2011. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki. Ympäristöministeriö. 27 s. + liit. 8 s.

D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. 2011. Rakennusten energiatehokkuus. Ohjeet 2012. Luonnos 28.9.2010. Helsinki. Ympäristöministeriö. 62 s. + liit. 5 s.

Energiatodistus. 2011a [WWW]. [Viitattu 5.9.2011]. Saatavissa: www.ymparisto.fi/energiatodistus.

Energiatodistus. 2011b [WWW]. [Viitattu 5.9.2011]. Saatavissa: www.energiatodistus.motiva.fi.

Energiatodistusopas 2007 – Rakennuksen energiatodistus ja energiatehokkuusluvun määrittäminen. 2009. Ympäristöministeriö. 37 s. + liit. 103 s.

Hahtela, Y. & Kiiras, J. 2011. Talonrakennuksen kustannustieto 2011. Helsinki. Hahtela-kehitys Oy. 390 s.

Haukijärvi, M. 2005. Ikkunarakenteet – yleiskuvaukset. JUKO-ohjeistuskansio julkisivukorjaushankkeen läpiviemiseksi, Korjaustapakuvaukset. Tampere. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Talonrakennustekniikka.

Heljo, J., Nippala, E. 2007. Energiatehokkuus julkisissa hankinnoissa – Rakentaminen ja rakennukset. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 81 s. + liit. 10 s. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/1572/Energiatehokkuus_julkisissa_hankinnoissa_Rakentaminen_ja_rakennukset.pdf.

Hemmilä, K. & Saarni, R. 2001. Ikkunaremontti. Helsinki, Rakennustieto Oy. 115 s.

Holopainen, R., Hekkanen, M., Hemmilä, K. & Norvasuo, M. 2007. Suomalaisten rakennusten energiakorjausmenetelmät ja säästöpotentiaalit. Espoo, VTT Tiedotteita 2377. 104 s. + liit. 2 s.

IDA Indoor Climate and Energy 4.0. 2009. EQUA Simulation AB. 148 s.

IEA, International Energy Agency. 2011. [WWW]. [Viitattu 5.9.2011]. Saatavissa: www.iea.org.

Kallio, S. 2010. Asuinkerrostalon korjattavan seinä rakenteen rakennusfysikaalinen selvitys. Opinnäytetyö. Helsinki. Metropolia ammattikorkeakoulu, Rakennustekniikka. 63 s. + liit. 3 s.

Kankaanpää, Juha. Rahoitusinnovaatiot kuntien teknisellä sektorilla. Tampereen Yliopisto, 2010. [WWW]. [Viitattu 1.10.2011]. Saatavissa: <http://www.kuntatekniikka.fi/toimijat/kehto/Kupera-hankkeen%20tilaisuudet/tampere-seminaari1/Documents/Kankaanpaa%5B1%5D.pdf>

Karjalainen, K. & Kimari, P. 1999. Koulujen sisäilma ja energiatalous. Oulu. Suomen talotekniikan kehityskeskus (TAKE). 55 s. + liit. 26 s.

Kaukolämmön hinnat tyyppitaloissa eri paikkakunnilla. 2011. Energiateollisuus ry. [WWW]. [Viitattu: 5.9.2011].

Saatavissa: <http://www.energia.fi/tilastot/kaukolammon-hinnat-tyyppitaloissa-eri-paikkakunnilla>.

Kerrostalon ilmastomuutos – energiatalous ja sisäilmasto kuntoon. Ilmanvaihtojärjestelmien tarkastelu – lisähanke, KIMULI. Loppuraportti. 2010. Aalto-yliopisto. 56 s.

Kevyen polttoaineen hinnat. 2011. [WWW]. [Viitattu 5.9.2011]. Saatavissa: www.polttoaine.net.

Kouhia, I., Nieminen, J. & Pulakka, S. Rakennusten ulkovaipan energiakorjaukset. Espoo 2010, VTT, Tutkimusraportti VTT-R-04017-10. 43 s.

KOM(2011) 109. Energiatohokkuussuunnitelma 2011, Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle. Bryssel, 2011. Euroopan komissio. 18 s. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0109:FIN:FI:PDF>.

Kurnitski, J. Palonen, J., Enberg, S. & Ruotsalainen, R. 1996. Koulujen sisäilmasto – rehtorikysely ja sisäilmastomittaukset. Espoo. Teknillinen Korkeakoulu, Konetekniikan osasto, LVI-laboratorio. Sarja B 43. 60 s.

Kurnitski, J., Vilkki, R., Jokiranta, K., Kettunen, A-V. & Hejazi-Hashemi, S. 1997. Koulujen sisäilmasto ja kosteusvauriot. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, LVI-tekniikan laboratorio. Raportti B 46. 47 s.

Kurvinen, A. & Heljo, J. 2011. Hyvät käytännöt ja toimintamallit. EVAKO – Lähiökorttelikorjaamisen taloudellisen päätöksenteon kriteeristö. Tampere. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Lähiöohjelma 2008-2011 YM69/611/2008. 12 s.

Kärkkäinen, A. 2010. Gasfri påfyllning av värme- och kylsystem samt injustering av radiatorsystem. Väitöskirja. Helsinki, Aaltoyliopisto. TKK Dissertations 236. 154 s.

Kärkkäinen, Aatos. Tekniikan tohtori, toimitusjohtaja, Termotohtori Oy. Haastattelu 25.7.2011.

Lantto, J. 2011. Lähiökerrostalon talotekniset ja rakenteelliset korjaukset sekä niiden talouslaskelmat. Espoo. Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan laitos. 79 s.

Lämmitysverkoston perussäätö säästää rahaa ja luo terveellisen sisäilmaston –esite. 2002. Motiva. 12 s.

Lötjönen, O. 2010. Toimisto- ja koulurakennusten energiansäästökorjausten kannattavuus. Diplomityö. Espoo. Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. 107 s. + liit. 14 s.

Rakennusosien kustannuksia (ROK) 2011. Helsinki Rakennustieto Oy. 248 s.

RT 07-10946. Sisäilmastoluokitus 2008. Espoo, 2008. Rakennustietosäätiö. 22 s.

Ruokojoki, J. 2009. Kuntien omien rakennusten lämmön, sähkön ja veden kulutus v. 2009. Suomen Kuntaliitto. 14 s. + liit. 41 s.

SFS-EN 15217. 2007. Rakennusten energiatehokkuus. Menetelmät rakennusten energiatehokkuuden ilmoittamiseen ja energialuokitteluun (sertifiointiin). Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 17s. + liit. 10 s.

Seppänen, O. 1995. Rakennusten lämmitys. Espoo, Suomen LVI-yhdistysten liitto ry. 467 s.

Seppänen, O. 2008. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Anjalankoski, SOLVER palvelut oy. 348 s.

Seppänen, O., Seppänen, M. 1996. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Espoo, Sisäilmayhdistys ry. 279 s.

Suomen virallinen tilasto (SVT). Koulutuksen järjestäjät ja oppilaitokset [WWW]. ISSN=1796-3796. 2010a. Helsinki. Tilastokeskus [viitattu: 5.9.2011].

Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/til/kjarj/2010/kjarj_2010_2011-02-17_tie_001_fi.html.

Suomen virallinen tilasto (SVT). Kuluttajahintaindeksi [WWW].

ISSN=1796-3524. 2010b, Rahanarvonkerroin 1860 - 2010. Helsinki. Tilastokeskus [viitattu: 5.9.2011].

Saatavissa: http://www.stat.fi/til/khi/2010/khi_2010_2011-01-14_tau_001.html.

Suomen virallinen tilasto (SVT). Rakennukset ja kesämökit [WWW].

ISSN=1798-677X. 2010c, Liitetaulukko 3. Rakennukset lämmitysaineen mukaan 1970-2010. Helsinki. Tilastokeskus [viitattu: 5.9.2011].

Saatavissa: http://www.stat.fi/til/rakke/2010/rakke_2010_2011-05-26_tau_003_fi.html.

Suomen virallinen tilasto (SVT). Rakennukset ja kesämökit [WWW].

ISSN=1798-677X. 2010d, Rakennukset käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan. Helsinki. Tilastokeskus [viitattu: 5.9.2011].

Saatavissa: <http://tilastokeskus.fi/til/rakke/tau.html>.

Säkkinen, P. 1998. Oulunjoen ala-asteen ilmanvaihdon perusparannus. Insinöörityö. Oulu. Oulun teknillinen oppilaitos.

Tilasto: Energian hankinta, kulutus ja hinnat [WWW].

ISSN=1798-3363. 2011. Tietokantataulukko: Energian hankinta, kulutus ja hinnat. Helsinki. Tilastokeskus [viitattu: 5.9.2011].

Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ehkh/tau.html>.

Vim-Ilma Oy. Haastattelu 8.8.2011.

Vinha, J. 2011. RTEK-3511 Rakennusfysiikka, luentomoniste, Osa 1. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 520 s.

VK 47/03/2011. Vuoden 2011 laskelmissa käytettäväksi tarkoitettu korkokustannus. Helsinki 2011, Valtionkonttori. 1 s. + liit. 1 s.

Ympäristöministeriön (YM) asetus rakennusten energiatodistuksesta. 2007. [WWW]. [Viitattu 5.9.2011].

Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=69790>.

2010/31/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi. 19.5.2010. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=119069&lan=fi>

LIITTEET

- Liite 1: Koulun A yksityiskohtaisen simulointimallin vyöhykekohtaiset tiedot.
- Liite 2: Koulun B yksityiskohtaisen simulointimallin vyöhykekohtaiset tiedot.
- Liite 3: Koulun A yksityiskohtaisen simulointimallin sisäisten kuormien aikataulut.
- Liite 4: Koulun B yksityiskohtaisen simulointimallin sisäisten kuormien aikataulut.
- Liite 5: Koulun A pohjapiirros ja jako simuloinneissa käytettyihin vyöhykkeisiin.
- Liite 6: Koulun B pohjapiirros ja jako simuloinneissa käytettyihin vyöhykkeisiin.

Koulun A yksityiskohtaisen simulointimallin vyöhykekohtaiset tiedot.

Vyöhyke	Kuvaus	Lattia-ala	Ihmisten lkm ¹	Laitteiden lkm ²	Valojen lkm ³	Huonelämpötila
1	Luokka	41,97	5	8	6	20,1
2	Ruokala	41,20	15	1	6	22,7
3	Muu	21,56	0	10	2	22,7
4	Muu	22,30	5	1	2	20,1
5	Muu	1,95	0,2	0	0,5	20,1
6	Muu	9,48	0	1	1	20,1
7	Muu	9,96	1	4	1	20,1
8	Porrask.	12,88	1	0	1	22,7
9	Muu	7,71	0	1	1	20,1
10	Muu	8,91	0	8	1	20,1
11	Muu	8,09	2	0	1	22,7
12	Muu	8,17	1	1	1	20,1
13	Käytävä	40,66	4	1	3	22,7
14	Muu	9,41	1	0	1	22,7
15	Porrask.	3,03	0,5	0	0,2	10,0
16	Muu	19,10	2	10	2	22,7
17	Muu	11,56	1	5	1	20,1
18	Muu	8,42	1	0	1	20,1
19	Liikuntasali	75,78	12	0	12	20,1
20	Muu	20,63	1	1	2	17,8
21	Porrask.	11,88	1	0	1	17,8
22	Luokka	61,77	12	4	12	22,7
23	Luokka	46,52	6	4	10	20,1
24	Porrask.	11,30	2	0	1	17,8
25	Muu	5,98	0	0	1	17,8
26	Muu	5,54	0	0	1	20,1
27	Käytävä	39,15	5	5	5	17,8
28	Luokka	58,07	12	4	10	20,1
29	Luokka	46,63	10	4	8	20,1
30	Luokka	36,49	5	6	6	20,1
31	Muu	15,35	2	2	2	20,1
32	Muu	8,51	1	0	1	20,1
33	Porrask.	13,96	1	0	1	17,8
34	Muu	12,04	2,5	6	2	17,8
35	Muu	15,14	1	1	2	20,1
36	Käytävä	23,37	2	0	3	17,8
37	Muu	21,48	6	2	3	20,1
38	Muu	5,64	1	0	1	20,1
39	Ullakko	11,05	1	0	1	10,0
40	Ullakko	27,47	0	2	2	10,0
41	Ullakko	236,90	0	3	4	10,0

¹ Ihmisten osalta käytetty aineenvaihdunnan arvona oletusarvoa 1,0 met, joka vastaa 108W (lämmönluovutuksen pinta-ala on 1,8m²). Vaatetuksen osalta käytetty niin ikään IDA-ohjelmiston oletusarvoa 0,85 ± 0,25 clo.

² Laitteen tuottamana lämpötehona on käytetty 100W.

³ Valaistuksen yksikkötehona on käytetty 100W.

Koulun B yksityiskohtaisen simulointimallin vyöhykekohtaiset tiedot.

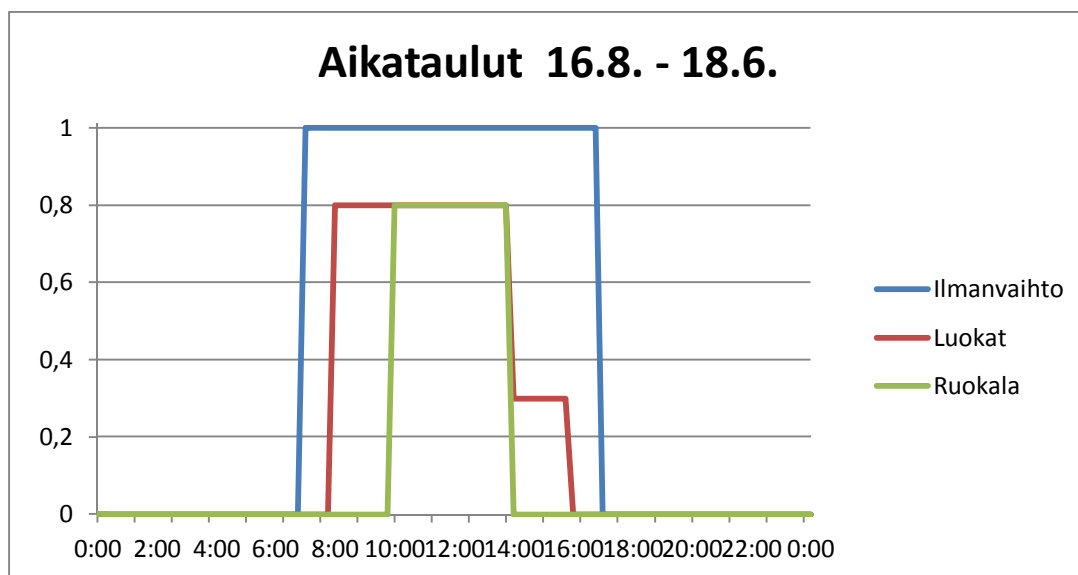
Vyöhyke	Kuvaus	Lattia-ala	Ihmisten lkm ¹	Laitteiden lkm ²	Valojen lkm ³	Huonelämpötila
1	Luokka	57,58	20	4	9	22,0
2	Luokka	57,96	20	4	9	22,0
3	Luokka	57,69	20	4	9	22,0
4	Luokka	114,00	15	8	18	22,0
5	Luokka	66,19	20	5	11	22,0
6	Luokka	64,71	20	5	11	22,0
7	Luokka	72,73	20	6	13	22,0
8	Luokka	58,55	20	4	9	22,0
9	Luokka	59,59	20	4	9	22,0
10	Liikuntasali	469,80	30	0	56	22,7
11	Luokka	67,19	20	5	11	22,0
12	Porrask.	36,02	20	0	14	22,1
13	Porrask.	25,70	15	0	10	22,1
14	Porrask.	29,53	15	0	10	22,1
15	Muut	158,30	20	25	27	22,7
16	Käytävä	333,20	50	5	33	23,2
17	Porrask.	20,07	10	0	5	22,1
18	Porrask.	23,48	0	0	5	22,1
19	Muut	180,10	3	16	16	22,7
20	Muut	11,07	0	15	1	22,7
21	Muut	128,50	3	20	15	22,7
22	Ruokala	242,70	40	20	30	22,7
23	Muut	30,07	1	15	5	22,7
24	Muut	68,36	1	4	6	22,7
25	Muut	270,80	5	20	30	22,7
26	Käytävä	97,72	25	2	10	23,2
27	Käytävä	259,40	30	4	26	23,2
28	Luokka	22,04	5	2	4	22,0
29	Luokka	65,58	20	5	11	22,0
30	Muut	39,55	2	0	4	22,7
31	Muut	61,41	2	5	6	22,7
32	Muut	54,64	2	5	5	22,7
33	Muut	45,91	2	5	5	22,7
34	Muut	516,90	1	10	20	22,7
35	Muut	57,16	1	15	3	22,7
36	Luokka	64,80	15	4	9	22,0
37	Muut	68,38	10	20	7	22,7
39	Muut	46,92	10	15	5	22,7
40	Luokka	66,82	10	3	9	22,0
42	Käytävä	62,00	10	0	6	23,2
43	Muut	249,90	4	8	30	22,7
44	Muut	50,49	1	1	5	22,7
45	Käytävä	121,50	20	4	12	23,2
46	Muut	65,39	1	4	8	22,7
47	Porrask.	61,06	0	0	8	22,1
48	Luokka	47,81	20	4	9	22,0
49	Luokka	48,88	20	4	9	22,0
50	Muut	42,14	1	2	4	22,7
51	Muut	21,18	1	15	2	22,7
52	Muut	130,80	2	3	23	22,7

¹ Ihmisten osalta käytetty aineenvaihdunnan arvona oletusarvoa 1,0 met, joka vastaa 108W (lämmön-luovutuksen pinta-ala on 1,8m²). Vaatetuksen osalta käytetty niin ikään IDA-ohjelmiston oletusarvoa 0,85 ± 0,25 clo.

² Laitteen tuottamana lämpötehona on käytetty 100W.

³ Valaistuksen yksikkötehona on käytetty 100W.

Koulun A yksityiskohtaisen simulointimallin sisäisten kuormien aikataulut.



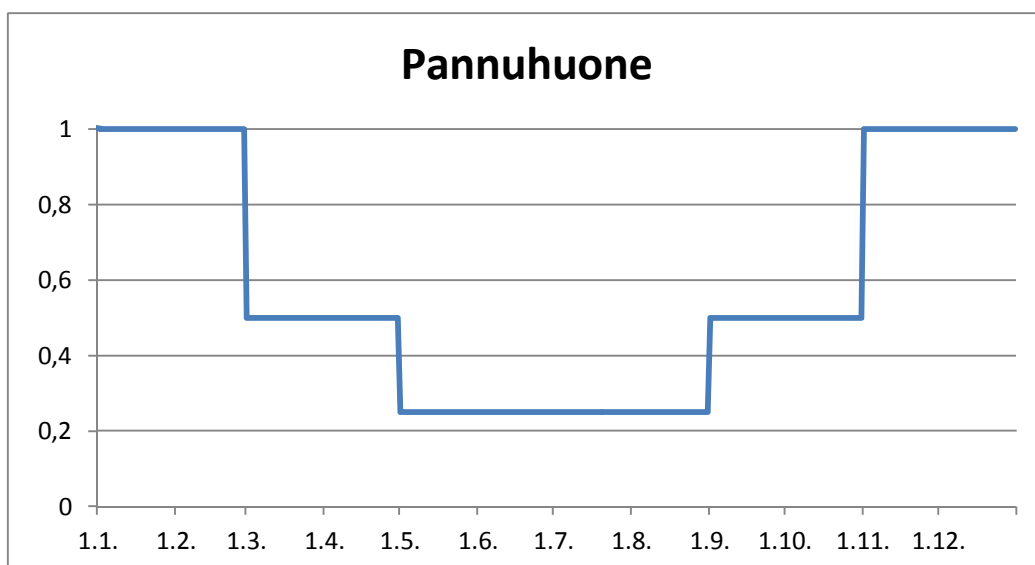
Ilmanvaihto-aikataulua käytettiin käytävien ja porraskäytävien sähkölaitteiden ja valojen osalta sekä koulun ilmanvaihdon osalta.

Luokat-aikataulua käytettiin muiden kuin käytävä- ja porraskäytävätilojen sähkölaitteiden ja valojen osalta (lukuun ottamatta pannuhuonetta), sekä kaikkien koulun henkilökuormien osalta.

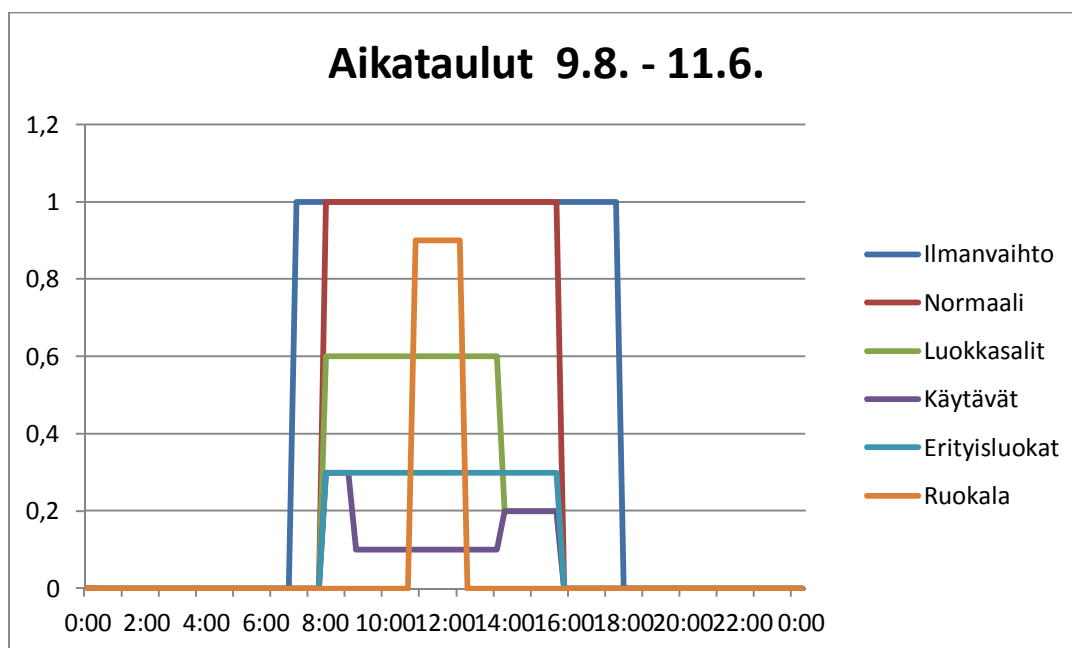
Ruokala-aikataulua käytettiin koulun ruokalan ja liikuntasalin henkilökuormien osalta.

Edellä mainittut aikataulut eivät koske kesäaikaa 19.6.-15.8., jolloin koulu on suljettu ja ilmastointi olivat pois päältä. Tällöin aikataulut ovat nollassa.

Pannuhuoneen (vyöhyke 3) sähkölaitteille oli oma aikataulunsa, joka on esitetty seuraavassa:



Koulun B yksityiskohtaisen simulointimallin sisäisten kuormien aikataulut.



Ilmanvaihto-aikataulua käytettiin käytävien, porraskäytävien ja wc-tilojen laitteiden sekä valojen osalta, sekä koulun ilmanvaihdon osalta.

Normaali-aikataulua käytettiin muiden kuin edellä mainittujen tilojen osalta koko koulun valaistus- ja laitekuormien aikatauluna. Lisäksi sitä käytettiin myös henkilökuormien osalta muissa kuin edellä mainituissa ja luokka-, liikunta- ja ruokailutiloissa.

Luokkasalit-aikataulua käytettiin normaalien opetusluokkien henkilökuormien osalta.

Käytävät-aikataulua käytettiin käytävien, porraskäytävien ja wc-tilojen henkilökuormien aikatauluna.

Erityisluokat-aikataulua käytettiin luokkien kuten musiikin, kuvaamataidon ja käsitöiden luokkien aikatauluna. Lisäksi sitä käytettiin liikuntasalin aikatauluna.

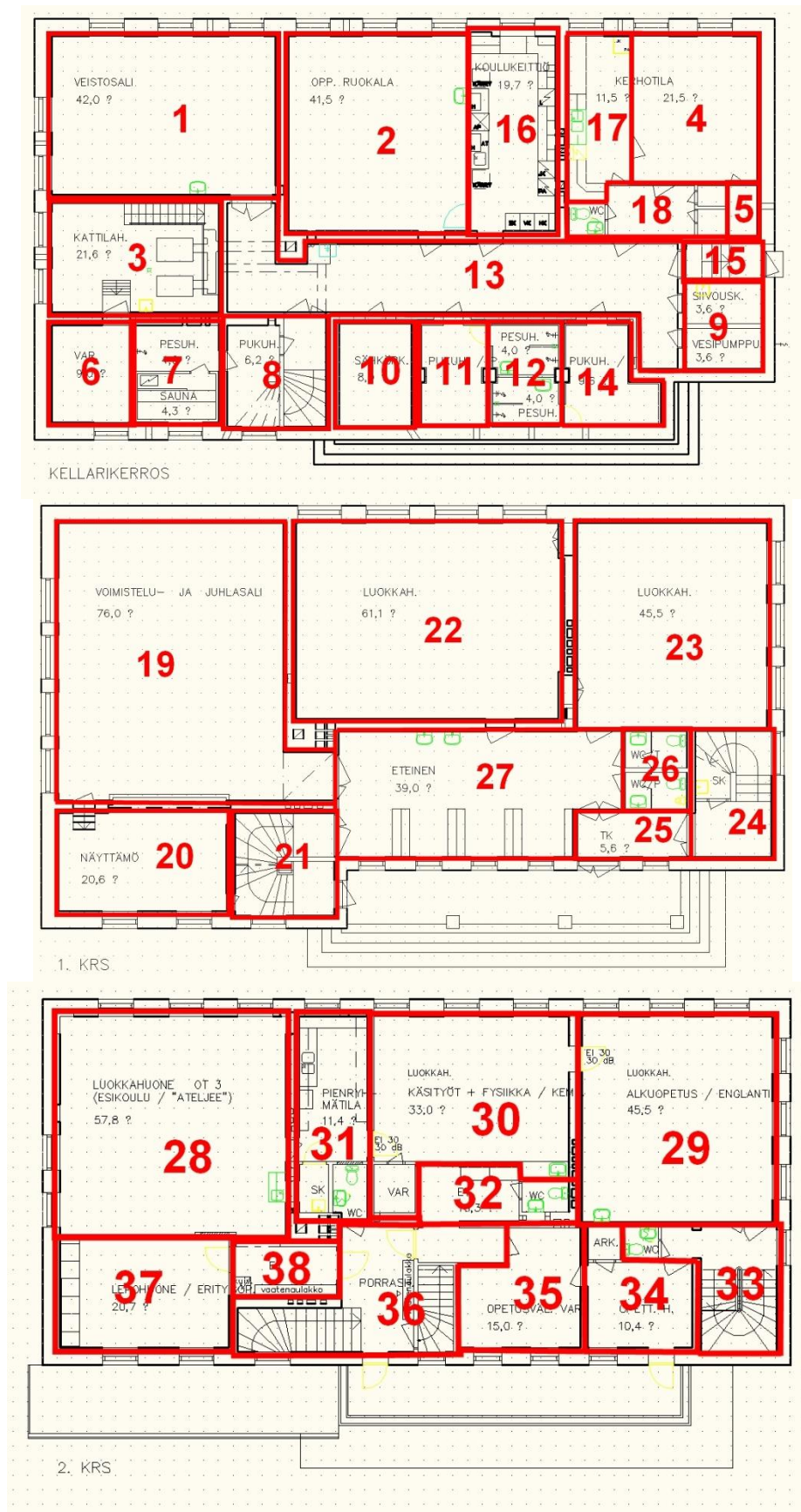
Ruokala-aikataulua käytettiin ruokalan henkilökuormien osalta.

Edellä mainitut aikataulut eivät koske kesäaikaa 12.6.-8.8., jolloin koulu on suljettu ja ilmastointi olivat pois päältä.

Ainoastaan koulun tiloissa toimiva kirjasto oli toiminnassa kesällä. Kirjaston ilmastointi ja laitteet toimivat talvella kuten muukin ilmastointi, mutta kesällä se on päällä 9-20. Kirjaston henkilö- ja valaistuskuormat ovat talvella Normaali-aikataulun mukaiset, mutta kesällä kuorma on 1 välillä aikavälillä 12-17.

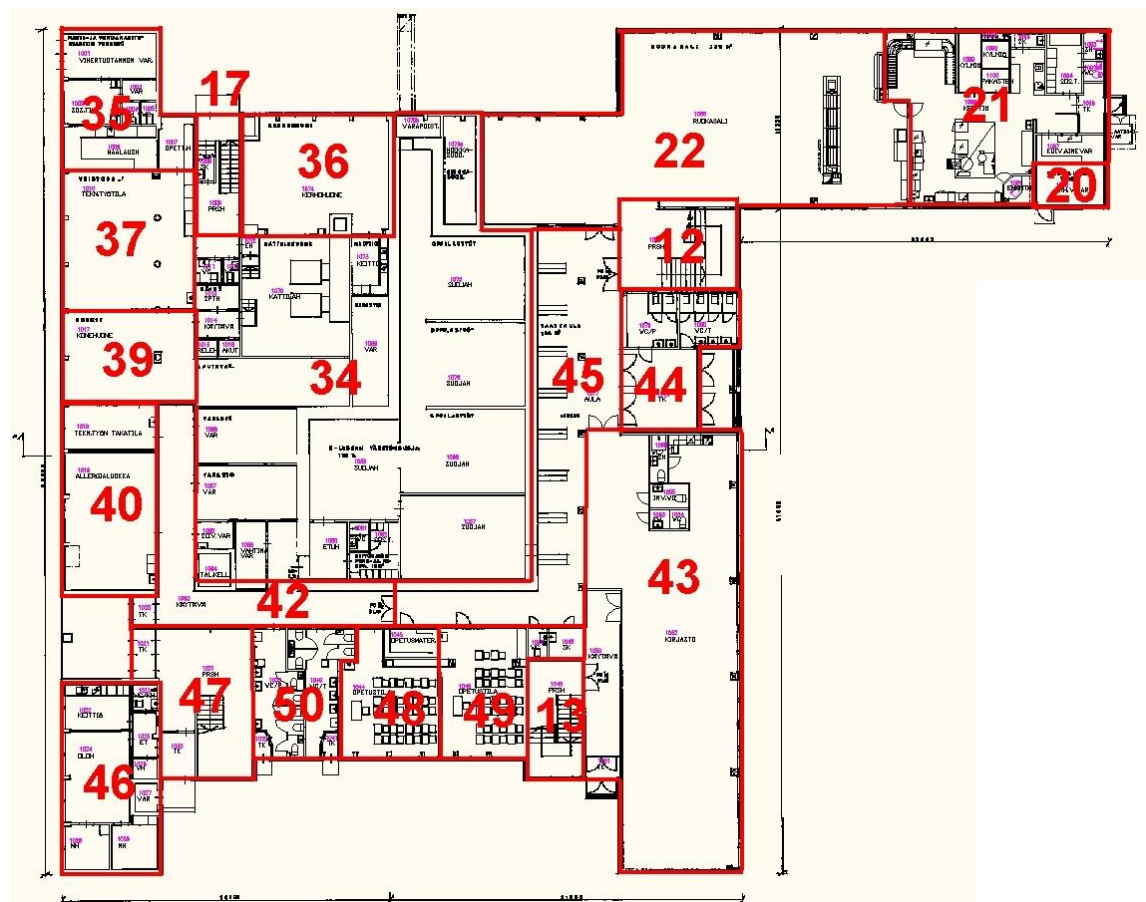
Muutamien tilojen (kuten väestönsuojan pannuhuone ja atk-tilat) valaistus ja sähkölaitteet ovat tämän lisäksi päällä vuoden ympäri Normaali-aikataulun mukaisesti.

Koulun A pohjapiirros ja jako simuloinneissa käytettyihin vyöhykkeisiin.



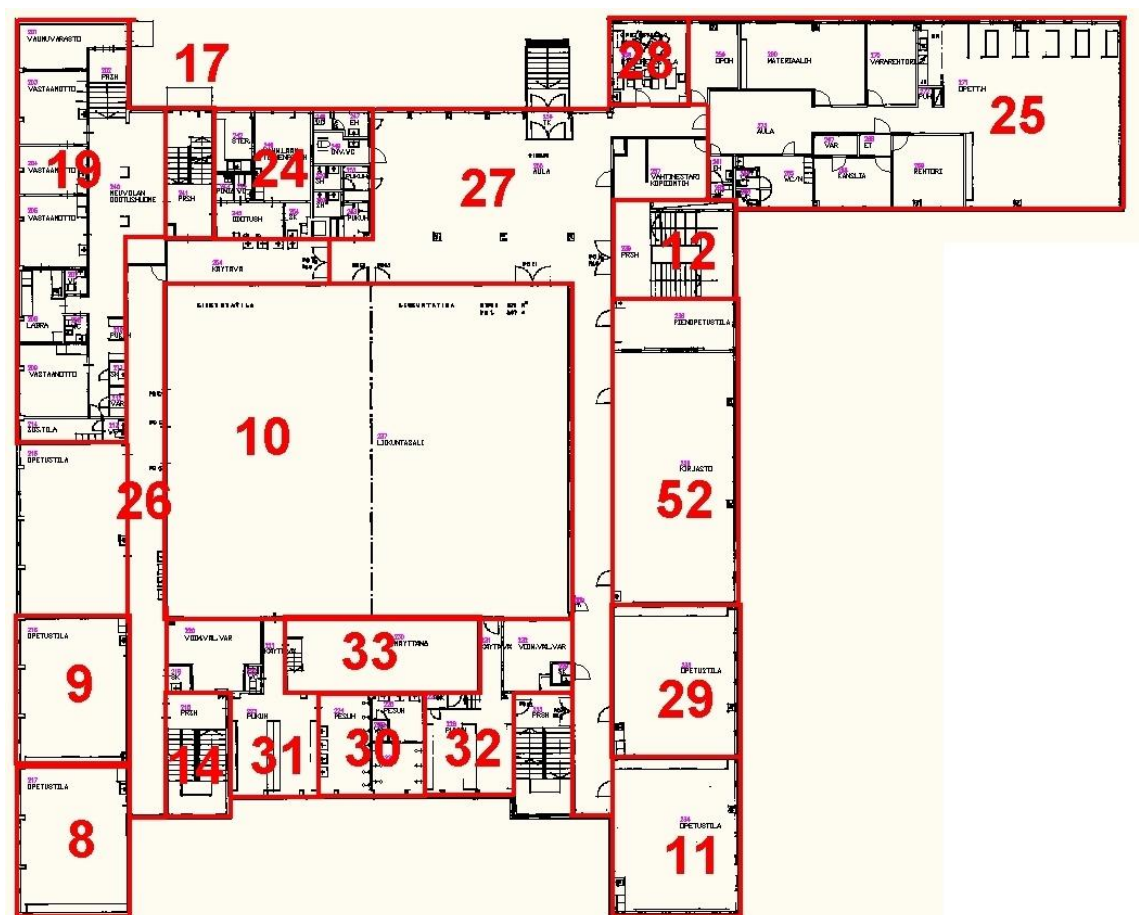
Koulun B pohjapiirros ja jako simuloinneissa käytettyihin vyöhykkeisiin.

Kerros 1:



Koulun B pohjapiirros ja jako simuloinneissa käytettyihin vyöhykkeisiin.

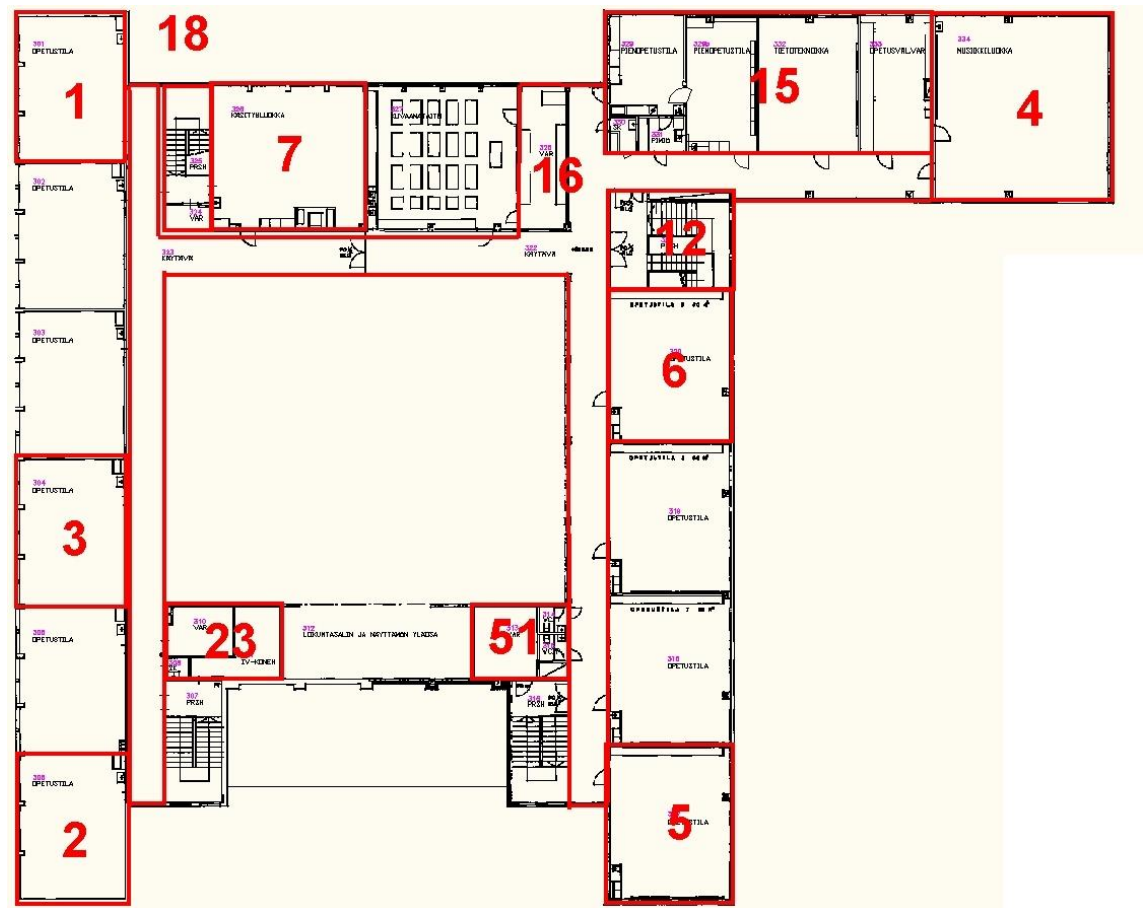
Kerros 2:



Osa luokista on mallinnettu monistamalla viereistä tilaa (vyöhyke 9).

Koulun B pohjapiirros ja jako simuloinneissa käytettyihin vyöhykkeisiin.

Kerros 3:



Osa luokista on mallinnettu monistamalla viereistä tilaa (vyöhykkeet 3, 6 ja 7).